

TH - 0B 4

UNIVERSITE AIX - MARSEILLE II

INSTITUT DE GEOGRAPHIE

CONTRIBUTION A L'ANALYSE DES MICROCLIMATS
AU NIVEAU DE L'ARBRE, DE COUVERTS FORESTIERS
ET DE PARCELLES AGRICOLES ENTOUREES DE BRISE - VENT

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Géographie

Mention : Climatologie

Présentée par Michel VERBRUGGHE

Soutenue le 26 Avril 1989, devant le jury :

M
Melle
MM.

S. DE PARCEVAUX
A. DOUGUEDROIT
G. AUSSENAC
H. DELANNOY
G. GUYOT
M. LECOMPTE

Président.
Rapporteur.
Examineurs.

**CONTRIBUTION A L'ANALYSE DES MICROCLIMATS
AU NIVEAU DE L'ARBRE, DE COUVERTS FORESTIERS
ET DE PARCELLES AGRICOLES ENTOUREES DE BRISE – VENT**

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes très sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce travail et plus particulièrement :

S. de PARCEVAUX, Directeur de Recherche à l'I.N.R.A - PARIS-GRIGNON pour ses conseils et pour avoir accepté de présider le jury.

A. DOUGUEDROIT, Professeur à l'Université d'Aix-Marseille II pour avoir dirigé cette thèse et en être le rapporteur.

G. GUYOT, Directeur de Recherche à l'I.N.R.A Montfavet qui a suivi mes travaux et m'a fait profité de son expérience en bioclimatologie.

M. LECOMPTE, Professeur à l'Université de Paris VII, G. AUSSENAC, Directeur de Recherche à l'I.N.R.A. Nancy et H. DELANNOY, Maître de conférences à l'Université d'Aix-Marseille II qui ont bien voulu faire partie du jury.

Mes remerciements vont aussi à P. BAUTRAIS, B. BACULAT, J.F. HANOCQ, P. PYRRA, J. SAUMADE, Ch. VIGNE qui, par leur collaboration efficace lors des campagnes de mesures, ont rendu possible la réalisation de ce travail.

Je tiens aussi à remercier J.C. FERREN et J. SAUMADE qui ont eu la charge des dessins et C. POITOUT qui a assuré la dactylographie du texte.

Je remercie enfin la station de Bioclimatologie-STEFCE de l'INRA de Montfavet pour m'avoir donné les moyens matériels de réaliser cette thèse.

Que tous soient assurés de ma gratitude et de ma reconnaissance.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	8
I. LES MECANISMES D'ECHANGE D'ENERGIE DANS LES BASSES COUCHES DE L'ATMOSPHERE : METHODES ET TECHNIQUES DE MESURES	11
1.1. LES COMPOSANTES DU BILAN D'ENERGIE A LA SURFACE DU SOL	12
1.1.1. Le rayonnement net	14
1.1.2. Le flux de chaleur dans le sol	14
1.1.3. Le flux de chaleur sensible	15
1.1.4. Le flux de chaleur latente	15
1.2. LES ECHANGES D'ENERGIE MECANIQUE AU VOISINAGE DU SOL	16
1.2.1. Les profils de vent au voisinage du sol dans une zone plane et dégagée	16
1.2.2. Le rôle de la stratification thermique	18
1.2.3. La formation des microclimats dans une zone plane et homogène	20

1.3. LE MATERIEL DE MESURES UTILISE	
POUR LES ETUDES ANALYTIQUES	25
1.3.1. Organisation générale de l'acquisition des données	25
et de leurs traitements	
1.3.2. Les capteurs	26
1.3.2.1. Les mesures de vitesse et de direction du vent	26
a. Les anémomètres	
b. Les girouettes	
1.3.2.2. Les mesures de rayonnement	27
a. La thermopile de Moll	
b. Le pyranomètre linéaire	
1.3.2.3. Les mesures de températures	28
a. Les mesures de température de l'air	
b. Les mesures de température du sol	
c. Les mesures de température des végétaux	
1.3.2.4. Les mesures d'humidité de l'air	30
1.3.3. Les centrales d'acquisitions de données	31
a. La centrale d'acquisition de données Aandera	
b. La centrale d'acquisition de données Bruyère	
1.4. CONCLUSIONS	35
II. LE MICROCLIMAT DE L'ARBRE	36
2.1. BILAN D'ENERGIE D'UN ELEMENT VEGETAL	37

2.2. ANALYSE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE D'UN TRONC D'ARBRE FRUITIER	40
2.2.1. L'expérimentation	40
2.2.2. Influence de l'orientation	41
2.2.3. Gradients verticaux de température de surface	44
2.3. INFLUENCE DE LA COULEUR DU TRONC SUR LA TEMPERATURE DE SURFACE	50
2.3.1. Protocole expérimental	50
2.3.2. Présentation générale des résultats expérimentaux	52
2.3.3. Analyse de l'évolution des températures à l'échelle de la journée	62
2.4. TEMPERATURE INTERNE D'UN RAMEAU	65
2.4.1. Comparaison de la température d'un rameau avec les températures mesurées en agrométéorologie	65
2.4.2. Influence des conditions météorologiques sur la variabilité des températures de rameaux d'arbres fruitiers	68
2.4.2.1. Protocole expérimental	68
2.4.2.2. Analyse des résultats expérimentaux	69
2.5. CONCLUSIONS	75
III. LE MICROCLIMAT DE COUVERTS FORESTIERS	77
3.1. LES ECHANGES ENERGETIQUES A L'INTERIEUR D'UN COUVERT FORESTIER	77

3.2. LES RESULTATS EXPERIMENTAUX	79
3.2.1. Sites expérimentaux et méthodologie	79
3.2.2. Les profils verticaux de rayonnement	83
3.2.3. Les profils verticaux de vitesse de vent	88
3.2.4. Les profils verticaux de températures	92
a. Comparaison entre les températures de l'air et les températures de surface de branches	
b. Comparaison des profils de températures de l'air sous couvert forestier et en zone ouverte	
3.2.5. Les profils d'humidité de l'air à l'intérieur d'un couvert forestier.	99
3.3. CONCLUSIONS	101
IV. LE MICROCLIMAT DE LA PARCELLE AGRICOLE ENTOUREE DE BRISE-VENT	102
4.1. LES EFFETS DES BRISE – VENT SUR LES ECHANGES TURBULENTS	103
4.1.1. Influence de la hauteur des brise – vent	103
4.1.2. Influence de la porosité des brise – vent	104
4.1.3. Influence des caractéristiques du vent	108
a. Rôle de la vitesse du vent	
b. Rôle de la rugosité du plan	
c. Rôle de la stabilité de l'atmosphère	
d. Rôle de la turbulence de l'écoulement	
4.2. LES EFFETS DES BRISE – VENT SUR LE BILAN RADIATIF	111

4.3. ANALYSE DE RESULTATS EXPERIMENTAUX	116
4.3.1. Sites et dispositifs expérimentaux	116
4.3.2. Les effets aérodynamiques	121
a. Cas d'une parcelle entourée de haies peu perméables	
b. Cas d'une parcelle entourée de haies perméables	
c. Les profils verticaux de vitesse de vent	
d. Influence de la topographie sur l'écoulement de l'air dans une zone bocagère	
e. Influence de l'environnement sur l'écoulement de l'air dans une parcelle bocagère	
4.3.3. Les effets des brise-vent sur la température de l'air	132
a. Analyse de transects thermiques à l'intérieur de parcelles entourées de brise-vent dans la basse vallée du Rhône	
b. Les profils verticaux de températures en zone bocagère et en zone ouverte	
c. Cartographie thermique d'une parcelle dans le bocage	
4.3.4. Les effets des brise-vent sur l'humidité de l'air	142
a. Les profils verticaux d'humidité de l'air en zone bocagère et en zone ouverte	
b. Cartographie de l'humidité de l'air à l'échelle de la parcelle	
4.4. CONCLUSIONS	144
CONCLUSION GENERALE	148
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	158
BIBLIOGRAPHIE.	168

INTRODUCTION

Les aires d'extension et l'évolution des populations animales ou végétales sont liées aux facteurs climatiques. Pour interpréter des données biologiques, nous ne disposons généralement que de mesures effectuées de façon standard, sous des abris météorologiques, dans des zones bien dégagées. Ces données ne sont représentatives que du climat régional et ne rendent pas compte de la diversité des microclimats que l'on trouve en un lieu donné.

Dans ces conditions, les travaux que nous avons entrepris étaient destinés à analyser les mécanismes de modification du climat régional et de formation des microclimats à l'échelle de l'arbre, de peuplements forestiers et de parcelles agricoles entourées d'arbres. Pour cela, nous avons orienté notre étude sur une analyse des échanges énergétiques entre ces différentes structures arborescentes et leur environnement.

Au niveau de l'arbre, la prise en compte des fluctuations microclimatiques devrait permettre non seulement de mieux connaître les mécanismes relatifs à la physiologie de l'arbre (croissance et développement) mais également les conditions de prolifération de ses parasites (virus, bactéries, champignons, insectes). Elle devrait également aider à mieux comprendre les réactions de l'arbre à des accidents climatiques tels que le gel, les fortes températures ou la sécheresse.

L'association d'arbres en massif forestier contribue à modifier les échanges d'énergie entre le sol et l'atmosphère. Il est donc important de connaître les mécanismes de formation des microclimats à cette échelle. Ceci doit permettre d'expliquer les relations existant entre les différents êtres vivants de ce milieu. Les domaines d'application sont nombreux, ils vont de l'étude des pullulations de parasites aux techniques de sylviculture en passant par l'utilisation des forêts comme lieu de loisirs.

Les arbres seuls ou en alignement constituent également un des éléments de base de nombreux paysages ruraux. Ils introduisent un élément de variabilité du microclimat à l'échelle locale et même à l'échelle régionale (aménagement régional). L'analyse des mécanismes d'action des plantations de haies brise-vent sur les facteurs du microclimat doit permettre de comprendre leurs effets sur les populations animales ou végétales (développement des parasites, refuge pour les auxiliaires des cultures, abri pour le gibier) et sur la production agricole. Ces données sont par ailleurs indispensables aux responsables de l'aménagement du territoire.

Dans ce cadre, notre travail de thèse a essentiellement consisté à analyser, à partir des études imposées par la recherche et dans lesquelles nous avons la responsabilité des travaux expérimentaux, un ensemble de résultats complémentaires destinés à expliquer la formation de microclimats dans des milieux agricoles caractérisés par la présence de structures végétales arborescentes.

Notre exposé est orienté vers l'étude des mécanismes de formation des microclimats à des échelles différentes afin de répondre à des problèmes précis qui se posent dans le domaine agricole.

A l'échelle de l'arbre, nous nous sommes efforcés de fournir des éléments d'interprétation aux phyto-pathologistes qui s'intéressent au développement de maladies bactériennes qui affectent la zone cambiale située juste sous l'écorce. Ces maladies se développent durant la période hivernale aussi avons-nous opéré sur des arbres effeuillés.

A l'échelle de la forêt, nous avons essayé de caractériser l'interaction des arbres avec les facteurs climatiques afin de mieux connaître le microclimat de peuplement des cèdres. Ces études avaient pour objectif de déterminer les conditions favorables au développement de la tordeuse du cèdre (*Epinotia cedricida* Diakonoff).

A l'échelle du paysage agricole cloisonné par des brise vent, nos travaux ont été effectués principalement en Bretagne où nous avons essayé de caractériser l'impact de l'arasement des haies sur le microclimat lors des travaux connexes au remembrement. Les données acquises peuvent servir de base à l'interprétation des effets des haies sur la production agricole ainsi que sur la faune et la flore, et également être utilisées pour établir de nouvelles règles relatives à l'aménagement du territoire. Des travaux ont également été entrepris dans la Basse Vallée du Rhône de façon à préciser les effets microclimatiques des brise-vent implantés dans des zones de cultures maraichères.

Notre exposé comportera ainsi quatre parties. Un premier chapitre sera consacré à un bref rappel des mécanismes généraux qui régissent la formation des microclimats et à la présentation des méthodes et des techniques de mesure que nous avons utilisées. Le second chapitre présentera les résultats des mesures que nous avons effectuées sur des arbres fruitiers en période hivernale. Il sera suivi par l'analyse du microclimat de cédraies et nous verrons ainsi le passage de l'arbre au massif forestier. Nous présenterons et discuterons dans le quatrième chapitre les effets des plantations linéaires d'arbres (haies) sur le microclimat des parcelles qui les bordent. Enfin une conclusion générale et une analyse critique mettra en évidence les principaux résultats obtenus et soulignera l'intérêt de la connaissance des microclimats en milieu agricole hétérogène.

I. LES MECANISMES D'ECHANGES D'ENERGIE DANS LES BASSES COUCHES DE L'ATMOSPHERE : METHODES ET TECHNIQUES DE MESURES

INTRODUCTION

Compte tenu de la complexité des phénomènes qui rendent interdépendant les paramètres biologiques et physiques des milieux agricoles, nous proposons avant d'analyser les mécanismes qui entrent en jeu, de rappeler les principes généraux qui régissent les échanges énergétiques entre le substratum (sol + végétation) et l'atmosphère.

Dans cette première partie, seront faits quelques brefs rappels des mécanismes de la thermodynamique et de la mécanique des fluides qui peuvent être appliquées à l'analyse de la formation des microclimats. Ces bases serviront à interpréter les résultats expérimentaux qui seront présentés dans la seconde partie de ce mémoire.

Par ailleurs, les études microclimatiques ont nécessité la mise en oeuvre de matériels adaptés aux mesures sur le terrain et de méthodes expérimentales originales qui seront également décrits dans ce chapitre.

1.1. LES COMPOSANTES DU BILAN D'ENERGIE A LA SURFACE DU SOL

Un des moyens d'analyse des principaux facteurs du milieu intervenant sur la croissance et le développement des végétaux est la détermination des échanges d'énergie qui s'établissent entre le végétal et le milieu ambiant. Ces échanges se produisent soit sous forme d'énergie radiative, soit sous forme d'échanges de chaleur ou de masse (H_2O , CO_2 ...) qui se réalisent par convection dans des fluides en mouvement ou par conduction au sein de milieux sans mouvement.

BOWEN (1926) fut un des premiers à expliciter la méthode du bilan d'énergie. La relation utilisée prend en compte la somme des échanges d'énergie au niveau d'une surface végétale avec les hypothèses d'homogénéité, d'absence d'inertie de la surface et de la conservation des flux, elle se traduit par l'équation (TANNER, 1960 ; De VRIES, 1963...) :

$$R_n + \Phi_s + \Phi_H + \Phi_L = 0 \quad (1.1.)$$

avec :

R_n : Rayonnement net,

Φ_s : Flux de chaleur dans le sol,

Φ_H : Flux de chaleur sensible dans l'air (dû à la convection et à la conduction),

Φ_L : Flux de chaleur latente (équivalent au flux de vapeur d'eau dû à l'évaporation).

Par convention, on compte positivement les gains en énergie au niveau de la surface d'échange (sol – atmosphère ou couvert végétal – atmosphère) et négativement les pertes d'énergie.

La figure 1.1. donne à titre d'exemple l'ordre de grandeur des variations des termes du bilan d'énergie d'un champ de maïs au cours d'une journée d'été en climat tempéré (PERRIER et al., 1975).

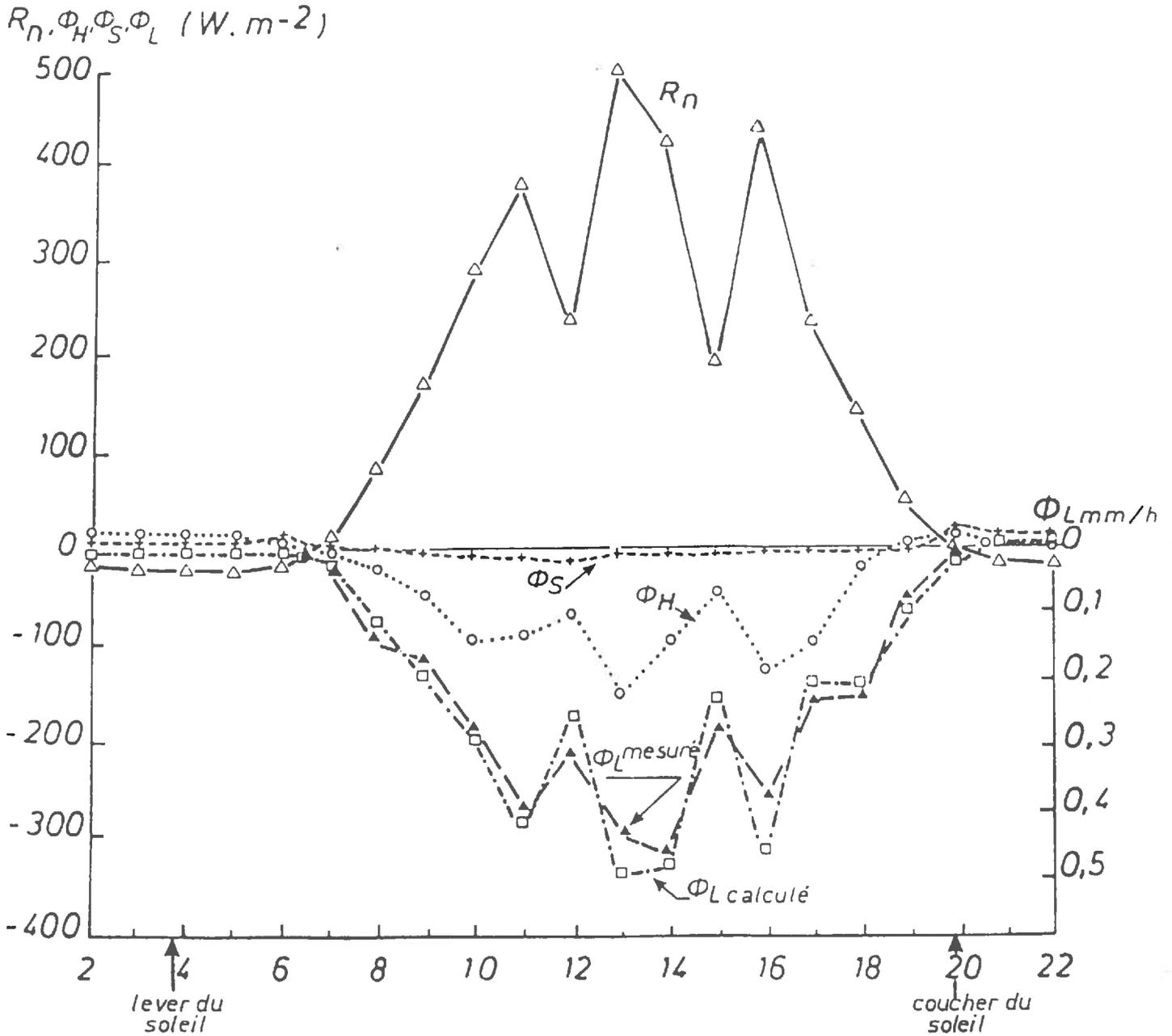


Figure 1.1.

Evolution journalière des différents termes du bilan d'énergie, d'un couvert de maïs, La Minière le 22/06/73 (PERRIER et al., 1975)

R_n : Rayonnement net.

Φ_s : Flux de chaleur dans le sol.

Φ_H : Flux de chaleur sensible dans l'air.

Φ_L : Flux de chaleur latente.

1.1.1. Le rayonnement net

Le rayonnement net d'une surface peut être défini par la relation :

$$R_n = (1 - a) R_g + R_a - R_s \quad (1.2.)$$

R_n : Rayonnement net, ($W.m^{-2}$)

a : Albedo (rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie incidente)

R_g : Rayonnement global (somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffus) de courte longueur d'onde (290 à 3500 nm) ($W.m^{-2}$)

R_a : Rayonnement atmosphérique dans les basses couches de l'atmosphère (infrarouge thermique)

avec $R_a = \sigma T_a^4$ ($W.m^{-2}$)

σ : Constante de Stefan – Boltzman : $5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$

T_a : Température radiative apparente de l'atmosphère (température absolue : K)

T_a est la température fictive qu'aurait un corps noir qui émettrait le même flux de rayonnement que l'atmosphère

R_s : Rayonnement de la surface d'échange (sol ou couvert végétal)

avec $R_s = \xi \sigma T_s^4$ ($W.m^{-2}$)

T_s : Température absolue de la surface d'échange en Kelvins

ξ : Emissivité (comprise entre 0,92 et 0,98), c'est le rapport du flux de rayonnement émis par un corps au flux qu'émettrait un corps noir porté à la même température.

1.1.2. Le flux de chaleur dans le sol

Le flux est une grandeur physique qui exprime la quantité d'un élément (masse ou énergie) qui traverse par unité de temps, suivant une direction, une surface repérée par sa normale.

Le flux de chaleur dans le sol peut être défini par la relation :

$$\Phi_s = K_s \frac{\Delta T_s}{\Delta Z} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (1.3.)$$

en première approximation, sa valeur est faible par rapport aux autres flux énergétiques (figure 1.1).

avec

K_s : Coefficient de conductivité thermique du sol, $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$

ΔT_s : Ecart de températures pour la différence de niveau Z . (K)

1.1.3. Le flux de chaleur sensible dans l'air

Le flux de chaleur sensible est déterminé essentiellement par les échanges de nature convective.

Il peut être défini par la relation :

$$\Phi_H = \rho C_p K_h(z) \frac{\Delta T_a}{\Delta Z} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (1.4.)$$

avec:

ρ : Masse spécifique de l'air, $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$

C_p : Capacité calorifique de l'air à pression constante, $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$

$K_h(z)$: Coefficient de diffusivité turbulente, $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$

ΔT_a : Ecart des températures de l'air pour la différence de niveau Z . (K)

1.1.4. Le flux de chaleur latente

Le flux de chaleur latente correspond essentiellement aux transferts de chaleur liés à l'évaporation ou à la condensation.

Le flux de chaleur latente Φ_L peut s'écrire :

$$\Phi_L = L K_h(z) \frac{\Delta C}{\Delta Z} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (1.5.)$$

avec

L : Chaleur latente de vaporisation de l'eau, ($2496.10^3 \text{ J.kg}^{-1}$)

$K_h(z)$: Coefficient de diffusivité turbulente, ($\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

ΔC : Ecart de concentration en vapeur d'eau pour la différence de niveau ΔZ
(kg.m^{-3})

1.2. LES ECHANGES D'ENERGIE MECANIQUE AU VOISINAGE DU SOL

Les échanges énergétiques au voisinage du sol dépendent étroitement des échanges d'énergie mécanique dont nous allons résumer les principales caractéristiques.

1.2.1. Les profils de vent au voisinage du sol dans une zone plane et dégagée

En absence d'obstacle et en régime d'écoulement turbulent établi (couche limite pleinement développée) les variations verticales de vitesse de vent sont données par les lois de la mécanique des fluides.

Dès 1932, SUTTON et PRANDTL mettaient en évidence le profil logarithmique de la vitesse du vent (figure 1.2a.).

L'expression simplifiée peut s'écrire :

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \text{Log} \frac{Z}{Z_0} \quad (1.6.)$$

avec

$u(z)$: Vitesse moyenne du vent au niveau Z , ($m\ s^{-1}$)

u^* : Vitesse de frottement avec $u^* = \sqrt{(\tau_0/\rho)}$ ($m\ s^{-1}$) où τ_0 = force de frottement exercée par le vent sur le sol et ρ = masse spécifique de l'air,

k : Constante de Von Karman, $k = 0,4$,

Z : Niveau de mesure, (m)

Z_0 : Paramètre de rugosité. (m)

En coordonnées semi-logarithmique le profil de vitesse de vent est représenté par une droite (figure 2a) dont l'ordonnée à l'origine détermine le paramètre de rugosité Z_0 et la pente le rapport k/u^* . Ce paramètre Z_0 traduit essentiellement l'état de surface sur laquelle se développe la couche limite turbulente.

Le tableau 1.1. donne à titre d'exemple quelques valeurs de Z_0 en fonction de la nature de surface (DEACON, 1949 ; SEGUIN, 1973...).

Tableau 1.1.

Valeurs du paramètre de rugosité pour différentes surfaces naturelles

Type de surface	Z_0 ($m \cdot 10^{-2}$)
Eau	0,01
Sol nu	0,5 - 2,0
Gazon ras 1 cm	0,1
Gazon dense 2 cm	2 - 3
Herbe jusqu'à 50 cm	5 - 7
Culture élevée > 50 cm	10 - 16

Dans le cas d'une surface dégagée recouverte d'une végétation de hauteur h , on obtient également une loi de variation de la vitesse du vent logarithmique mais pour un niveau $(Z - D)$ compté à partir d'une hauteur de déplacement du plan de référence D (UCHIJIMA, 1962 ; TANNER, 1963 ; TAKEDA, 1966) (figure 1.2b.). D'un point de vue aérodynamique, tout se passe dans ce cas comme si le niveau du sol se trouvait surélevé d'une hauteur D appelé la hauteur de déplacement.

$$u = \frac{u^*}{k} \text{Log} \frac{Z - D}{Z_0} \quad (1.7.)$$

La hauteur de déplacement D d'une culture élevée a une valeur de l'ordre de 0,7 fois la hauteur de végétation (MAKKINK et VAN HEEMST, 1970).

1.2.2. Le rôle de la stratification thermique

Au cours d'une journée, l'air chaud qui se trouve au contact du sol a tendance à s'élever. La stratification thermique est instable, on dit alors que le profil de vitesse de vent est un profil suradiabatique. La nuit, l'air se refroidit au contact du sol. L'air froid plus lourd se trouve à proximité du sol et la stratification thermique est stable, on parle alors de profil d'inversion (figure 1.3.). La loi logarithmique ne s'applique que lorsque le gradient vertical est voisin de zéro, c'est à dire lors de situations de neutralité thermique (isothermie).

L'amplitude des mouvements turbulents et la forme des profils dépendent des conditions de stratification thermique.

En condition instable, la vitesse du vent croît plus vite avec l'altitude que dans les conditions de stabilité thermique. Le profil du vent est alors représenté par une courbe dont la concavité est tournée vers le haut.

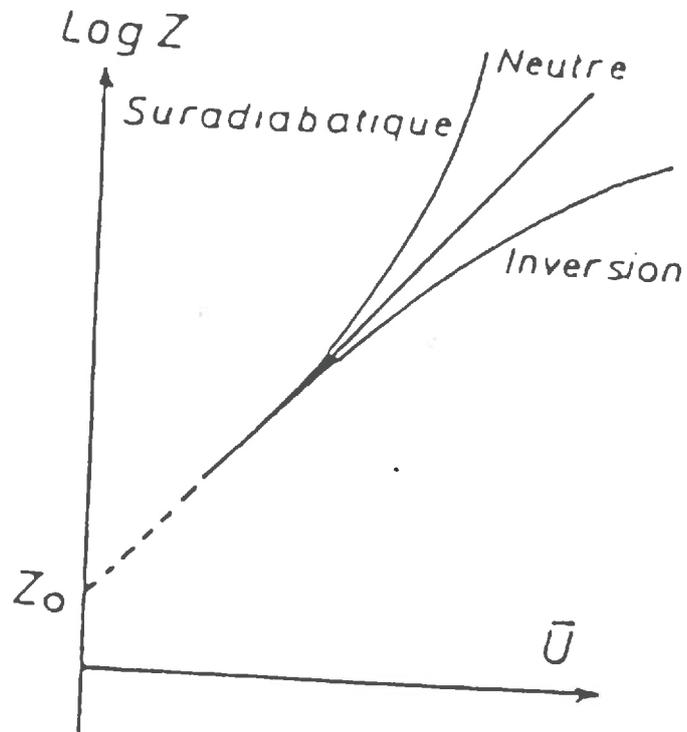


Figure 1.3.
Formes de profils de vitesse de vent dans différentes conditions de stratification thermique

Au contraire, dans les conditions de stratification thermique stable la vitesse du vent est plus réduite au niveau du sol et le profil de vitesse est représenté par une courbe dont la concavité est orientée vers le bas (figure 1.3.).

1.2.3. La formation des microclimats dans le cas d'une zone plane et homogène

Dans les zones planes et homogènes, les variations microclimatiques sont essentiellement fonction de la hauteur au-dessus du sol.

De l'interaction des différentes composantes du bilan radiatif et des échanges d'énergie mécanique résultent au voisinage du sol des profils verticaux de température et d'humidité dont les caractéristiques sont fonction des termes d'échange énergétique.

Le jour, l'apport énergétique au niveau de la surface d'échange provient du terme R_n , les pertes sont dues aux flux de chaleur sensible Φ_H et de chaleur latente Φ_L (évapotranspiration) dans l'atmosphère et de chaleur sensible dans le sol Φ_s . La résultante de ces échanges énergétiques se traduit par des profils verticaux de températures qui peuvent être assimilés à des courbes logarithmiques (analogie entre les échanges énergétiques et les échanges d'énergie mécanique). On observe une augmentation très importante de la température de l'air à proximité du sol dont la température de surface est supérieure à celle de l'air, le maximum de variations de température se situe dans les premiers centimètres au-dessus du sol (figure 1.4.).

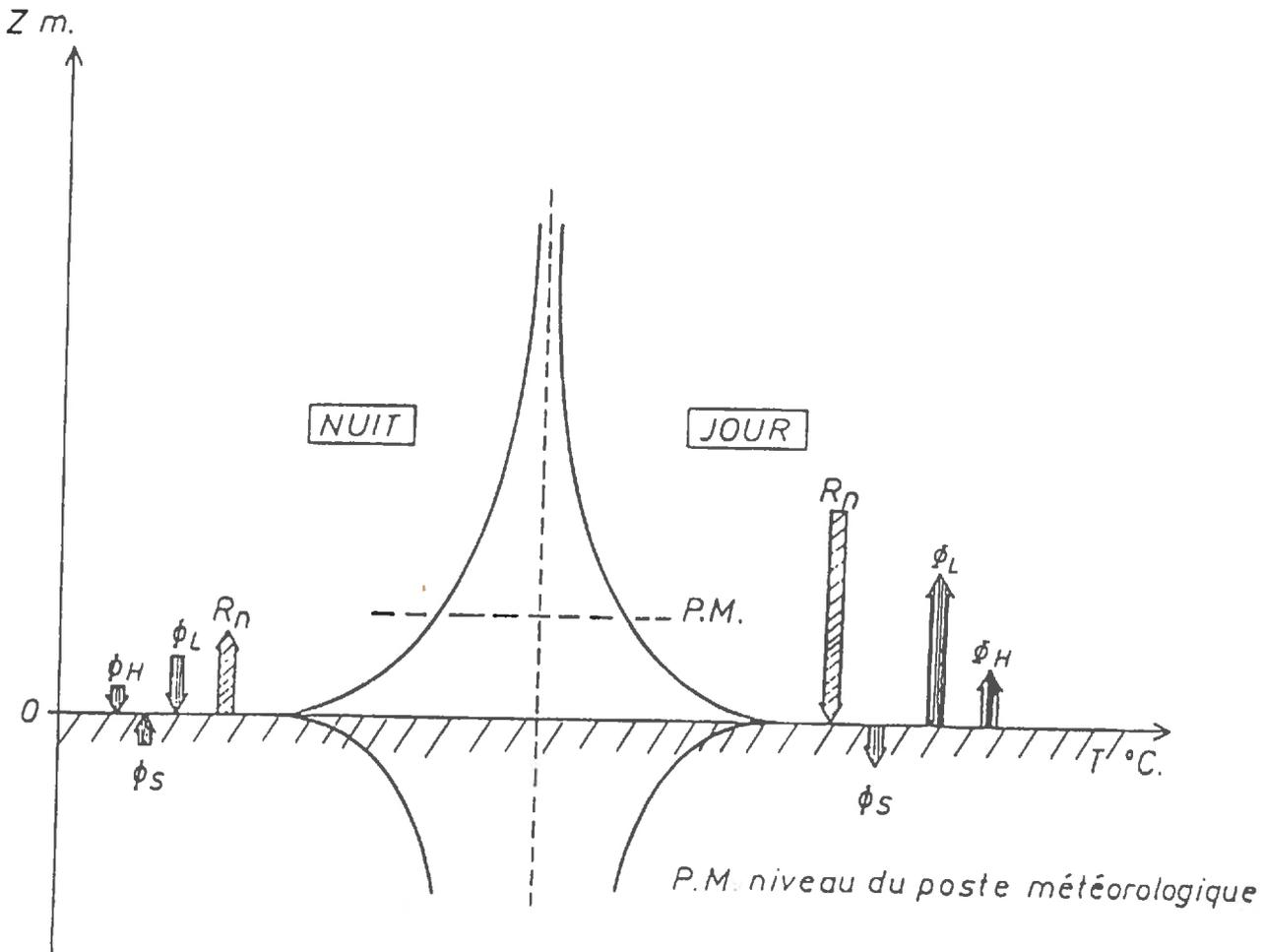


Figure 1.4.
Représentation schématique des profils verticaux de températures diurnes et nocturnes et des termes du bilan d'énergie par temps clair.

R_n : Rayonnement net.

Φ_s : Flux de chaleur dans le sol.

Φ_L : Flux de chaleur latente.

Φ_H : Flux de chaleur sensible.

La nuit, par temps clair, le sens de variation des flux est inversé, il se produit une perte d'énergie de la surface d'échange par rayonnement, le terme R_n est alors négatif par contre les termes Φ_H , Φ_L et Φ_s sont positifs. Du bilan de ces échanges, il résulte des profils verticaux de température de l'air caractérisés par une augmentation très rapide des températures à proximité du sol (figure 1.4.).

Par analogie les profils d'humidité peuvent être représentés en première approximation par des profils logarithmiques. Le jour, on observe une augmentation très importante de l'humidité de l'air au voisinage du sol. La nuit et selon les conditions, il y a au voisinage du sol, soit évaporation lorsque la température de surface d'échange est supérieure à celle de l'air et l'humidité de l'air inférieure à l'humidité de surface, soit condensation lorsque la température de surface est inférieure à celle de la masse d'air environnante et l'humidité de l'air supérieure à l'humidité de surface (figure 1.5.).

Les gradients microclimatiques verticaux sont d'autant plus accentués que les échanges d'énergie mécanique sont faibles. L'augmentation des échanges entre les basses couches de l'atmosphère (proximité du sol) et les couches situées à un niveau plus élevé se traduit par une réduction des gradients. Les profils microclimatiques dépendent également des apports radiatifs et de l'eau disponible. C'est ainsi que par situation de ciel clair ou de vent fort, les gradients de température de l'air et de tension de vapeur sont plus importants que par ciel couvert ou par vent faible. Les gradients de température sont plus importants sur sol sec que sur sol humide. Les gradients de tension de vapeur sont eux, plus accentués sur sol humide que sur sol sec (figure 1.6.)

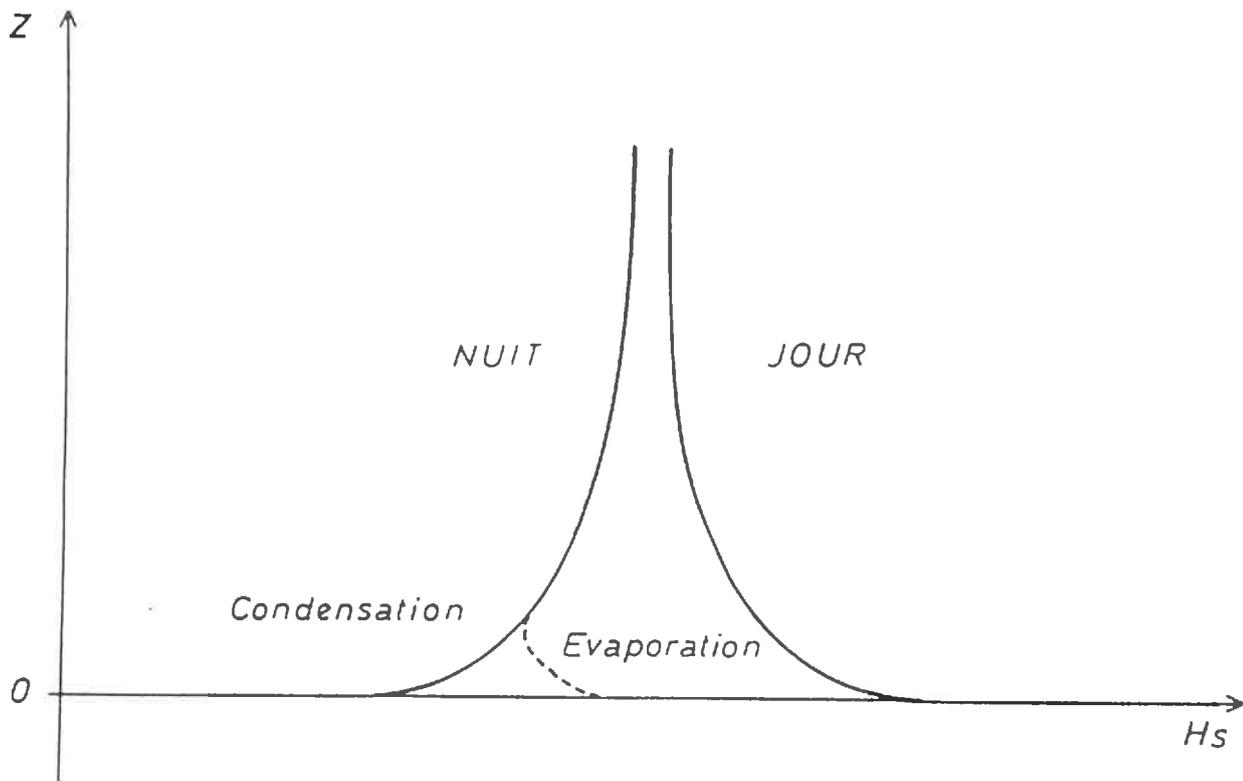


Figure 1.5.
Représentation schématique des profils verticaux de l'humidité de l'air

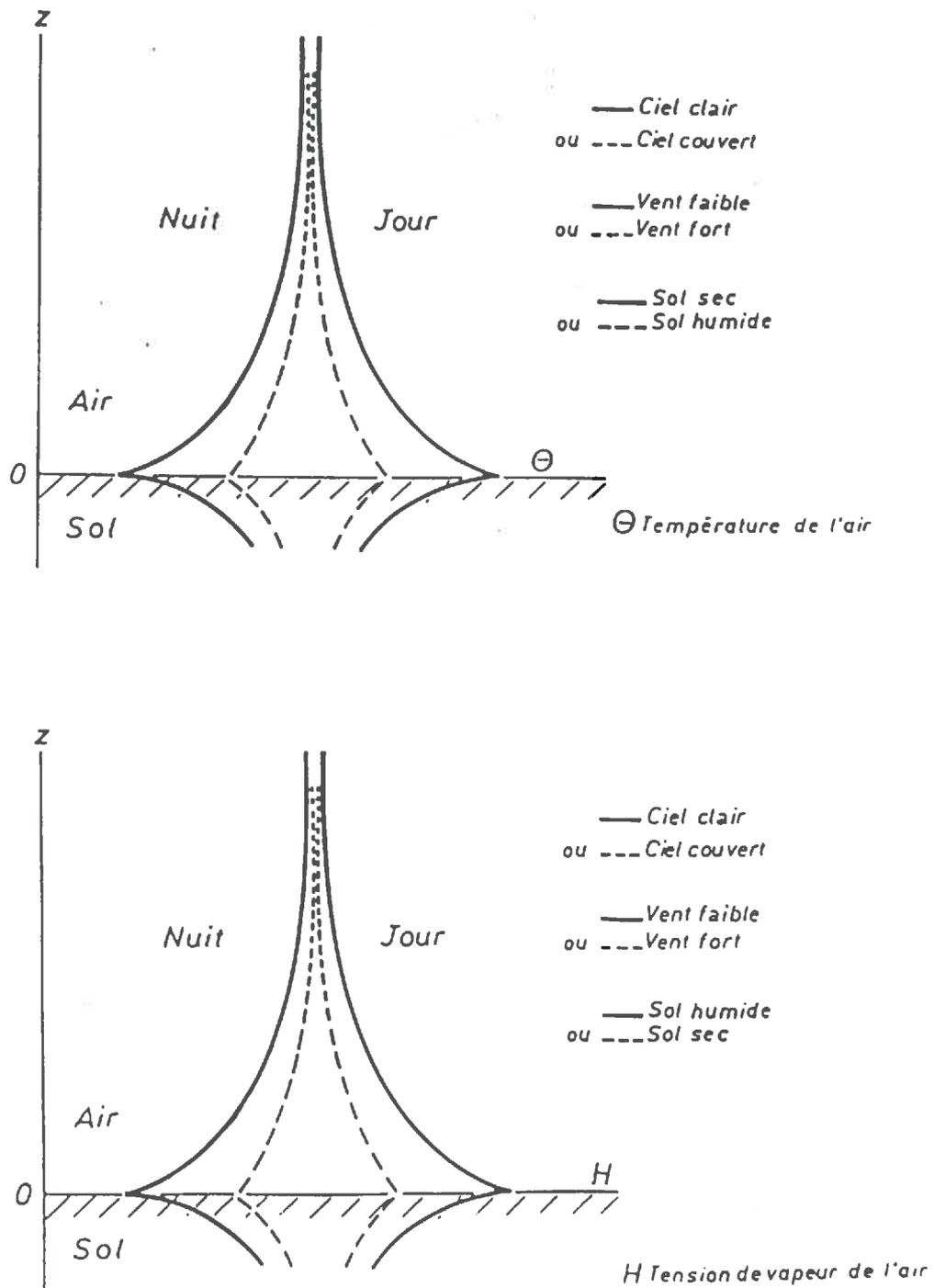


Figure 1.6.
Influence du bilan radiatif, de la vitesse du vent et du bilan hydrique sur les profils verticaux de température et de tension de vapeur de l'air.

1.3. LE MATERIEL DE MESURES UTILISE POUR LES ETUDES ANALYTIQUES

1.3.1. Organisation générale de l'acquisition des données et de leurs traitements

L'acquisition de paramètres physiques permettant la caractérisation microclimatique a nécessité l'utilisation ou la mise au point de systèmes d'acquisition et de traitements automatiques des données. Les principaux objectifs recherchés étaient les suivants :

- Regrouper en un point les informations fournies par de nombreux capteurs répartis dans l'espace,
- Obtenir la fiabilité et la précision des mesures à l'aide de l'électromécanique et de l'électronique tant au niveau des capteurs que des moyens de traitement ;
- Faciliter le traitement des données enregistrées sur un support commun aux différentes mesures : support informatique (cassettes, bandes magnétiques) ou non informatisé (imprimante).

Le choix des différents éléments qui constituent la chaîne d'acquisition des données à été déterminé essentiellement par les possibilités d'adaptation du matériel aux mesures sur le terrain (autonomie d'alimentation, résistance aux contraintes climatiques (humidité et température), possibilité de contrôle de données sur le terrain.

1.3.2. Les capteurs

1.3.2.1. Les mesures de vitesse et de direction du vent

a. Les anémomètres

La vitesse moyenne du vent a été mesurée à l'aide de deux types d'anémomètres à coupelles : les anémomètres Chauvin – Arnoux et les anémomètres Aandera.

Les anémomètres Chauvin – Arnoux sont des anémomètres classiques munis de 3 coupelles hémisphériques. Le moulinet est fixé à l'extrémité d'un axe de rotation qui entraîne par l'intermédiaire d'un réducteur un barreau aimanté, qui ferme un contact électrique à chaque tour. L'anémomètre fournit une impulsion tous les 100 m de vent passé. Le seuil de démarrage est compris entre 0,25 et 0,45 mètre par seconde.

Les anémomètres Aandera sont également des anémomètres à contact. Trois coupelles hémisphériques entraînent un axe sur lequel est placé un aimant qui ferme un microrupteur à chaque révolution. Une impulsion est générée au niveau d'un compteur toutes les 32 révolutions (38,4 mètres de vent passé). Le seuil de démarrage de ces anémomètres est de l'ordre de 0,5 mètre par seconde. Les tests comparatifs des mesures de vitesse de vent données par des anémomètres placés à 2 m du sol font apparaître de très fortes corrélations positives ($r = 0,99$) entre les anémomètres.

b. Les girouettes

La direction du vent a été déterminée à l'aide de deux types de girouettes : la girouette Jules Richard et la girouette Aandera.

Le principe de fonctionnement de la girouette Jules Richard est le suivant : un empennage fait tourner des balais sur un collecteur divisé en 16 secteurs. Les secteurs ont été reliés deux à deux de façon à obtenir la répartition du vent selon 8 directions.

La girouette Aandera est constituée par un empennage mobile autour d'un axe vertical, dont les mouvements sont amortis par un bain d'huile au silicone qui filtre les fluctuations brusques de la direction du vent. Les mouvements de l'empennage entraînent par l'intermédiaire d'un axe, un curseur sur la partie résistive d'un potentiomètre. La direction du vent est donnée par une tension dont le niveau dépend de la position du curseur sur la bande résistive.

1.3.2.2. Les mesures de rayonnement

Les mesures de rayonnement ont été faites à l'aide de deux types de capteurs : la thermopile de Moll et le pyranomètre linéaire.

a. La thermopile de Moll

Elle a été conçue pour mesurer le rayonnement visible et proche infrarouge. Elle est constituée d'une surface sensible noircie qui absorbe le rayonnement qui est filtré par deux coupelles de verre hémisphériques. Des thermocouples placés en série sous la surface sensible délivrent une tension proportionnelle au rayonnement absorbé. La sensibilité spectrale de la thermopile est liée à celle de la transmission spectrale de l'enveloppe de verre, elle se situe entre 0,3 et 3 μm . La sensibilité de la thermopile est d'environ $0,011 \text{ mV/W.m}^{-2}$, le coefficient de température est variable mais inférieur à 0,2 % par $^{\circ}\text{C}$ en moyenne.

b. Le pyranomètre linéaire

Cet appareil dont la sensibilité spectrale est aussi définie par les caractéristiques optiques du verre, a été conçu pour la mesure de rayonnement dans la végétation. Il a été réalisé de façon à ce que la surface réceptrice, intégrée sur une longueur d'environ 0,30 m, l'énergie radiative pénétrant à l'intérieur du couvert végétal. La taille du capteur permet de mesurer directement une valeur moyenne du rayonnement incident en prenant en compte les hétérogénéités d'ombre et de lumière dues à la structure de la végétation.

Le pyranomètre linéaire est constitué par un ensemble de "thermocouples" obtenus par un dépôt électrolytique discontinu de cuivre sur un fil de constantan et dont les soudures sont placées successivement sous une surface noire qui absorbe le rayonnement et une surface blanche qui le réfléchit.

La sensibilité du pyranomètre linéaire est d'environ $0,029 \text{ mV/W.m}^{-2}$. Le filtre est constitué par un tube pyrex perméable au rayonnement dans la gamme 0,3 à $3 \mu\text{m}$. Une comparaison de mesures instantanées du pyranomètre linéaire et de la pile de Moll a été effectuée pour des intensités de rayonnement variable, elle a mis en évidence une bonne correspondance entre la réponse des deux capteurs (COMBRES et al., 1970).

1.3.2.3. Les mesures de températures

a. Les mesures de températures de l'air

Les températures de l'air ont été mesurées à l'aide de thermocouples et de résistances de platine placés soit dans une prise ventilée, soit dans un psychromètre.

Les prises ventilées sont constituées par une double paroi en PVC formant une tuyère qui isole le capteur du flux de rayonnement solaire. Un micromoteur muni d'une hélice produit une ventilation forcée qui favorise l'équilibre entre le capteur et l'air. La vitesse de ventilation à l'intérieur de la tuyère est de l'ordre de 2 m.s^{-1} .

Les capteurs sont constitués soit par des thermocouples cuivre-constantan qui fournissent une force électromotrice de $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ soit par des sondes platines 100Ω ou 500Ω à 0°C qui délivrent, par l'intermédiaire d'un pont de Wheastone, une tension proportionnelle à la température. La précision de ces capteurs est de $\pm 0,1^\circ \text{C}$.

b. Les mesures de températures du sol

Les mesures de températures de sol ont été effectuées à l'aide de sondes à résistance de platine de 100Ω ou 500Ω à 0°C .

Ces capteurs étaient placés horizontalement et à 10 cm de profondeur au contact du sol. Ce niveau a été choisi de façon à éviter la zone qui se trouve à proximité de la surface où les gradients thermiques très accentués rendent les mesures peu représentatives.

Les caractéristiques de ces sondes sont identiques à celles utilisées pour la mesure de la température de l'air (§ 1.3.2.2.a.).

c. Les mesures de températures de végétaux

Les températures d'organes végétaux (rameaux, écorces...) ont été déterminées à l'aide de sondes platines placées au centre des rameaux et de thermocouples implantés dans l'écorce. Les différentes conditions d'utilisation de ces capteurs seront précisées dans les chapitres relatifs aux résultats expérimentaux.

Ces capteurs modifient légèrement le corps dont on veut connaître la température par la blessure qu'ils entraînent au niveau des tissus végétaux.

Cependant ces mesures de température rendent compte des échanges d'énergie qui se produisent entre l'organe végétal et l'atmosphère. La température de surface pouvant être considérée comme la résultante de ces échanges énergétiques.

Les thermocouples et les résistances de platine sont identiques à ceux utilisés pour les mesures de température de l'air.

1.3.2.4. Les mesures d'humidité de l'air

La teneur en eau de l'air est calculée à partir des températures sèches et humides de l'air mesurées à l'aide de psychromètres ventilés.

Le psychromètre ventilé est constitué par une tuyère dont les parois sont isolées par de la mousse de polyuréthane, cette tuyère protège du rayonnement les deux sondes sèche et humide qui sont séparées par une cloison verticale. La ventilation est assurée par une hélice à 6 pales actionnée par un petit moteur à courant continu. La vitesse de ventilation est de l'ordre de 5 m.s^{-1} .

L'humidification de la sonde mouillée est assurée par une mousseline de psychromètre d'abri météorologique. Les sondes utilisées ont sensiblement les mêmes dimensions que celles des réservoirs de thermomètre. La mousseline plonge dans un tube dans lequel le niveau d'eau est maintenu constant. L'eau monte par capillarité et humidifie la sonde.

Le tube qui alimente la mousseline en eau est relié à un réservoir dont la capacité est de 500 cm^3 . Le niveau d'eau dans le tube est maintenu constant grâce à un dispositif du type vase de Mariotte. Le réglage du niveau de l'eau dans le tube s'effectue en déplaçant le réservoir sur une glissière. Des essais comparatifs réalisés avec un psychromètre à aspiration d'Assman (appareil de référence) ont montré que la précision de la mesure était de l'ordre de grandeur de l'erreur de lecture des thermomètres : $\pm 0,1^\circ \text{ C}$.

1.3.3. Les centrales d'acquisition de données

L'acquisition simultanée de plusieurs paramètres climatiques est souvent indispensable à l'analyse des variations microclimatiques. Les mesures faites au même instant permettent en effet de limiter l'influence des fluctuations temporelles dans l'analyse d'un phénomène. C'est ainsi que nous avons été amené à utiliser des centralisateurs de données.

a. La centrale d'acquisition de données Aandera

Cette centrale a été conçue pour l'acquisition de paramètres climatiques sur le terrain. Elle se présente sous la forme d'une boîte cylindrique en plexiglass, légère et résistante à la pression (immersion possible jusqu'à 100 m). Un bornier de connexion relie les capteurs ou les adaptateurs (intégrateurs, compteurs d'impulsion) au centralisateur de données par l'intermédiaire de câbles.

Les grandeurs d'entrée peuvent se présenter sous forme de tension de résistance ou d'impulsions. Elles sont transformées en un demi-pont de Wheatstone composé d'une résistance fixe et d'une résistance variable, l'autre moitié du pont est constitué par des résistances dont le rapport varie de 1 à 1024 par puissance de 2.

Les demi-ponts sont comparés automatiquement entre eux par 10 comparaisons successives, le signal de sortie qui en résulte est un nombre binaire pur de 10 bits qui est enregistré sur une bande magnétique.

L'interrogation des capteurs se fait par l'intermédiaire d'une horloge à quartz qui commande la scrutation et l'enregistrement des informations provenant des capteurs selon la fréquence choisie.

L'alimentation électrique de la centrale est assurée par une pile, l'autonomie de l'appareil dépend de la fréquence de scrutation des capteurs (ex. : 33 jours pour une interrogation des 11 voies de mesure toutes les 10 minutes).

Le contrôle des données sur le terrain est réalisé à l'aide d'un système de visualisation par affichage numérique (HANOCQ, 1978).

Le traitement des données enregistrées sur bande magnétique se fait de façon automatique à l'aide d'un lecteur de bandes et de modules d'interfaces qui rendent compatibles les codes des bandes magnétiques et celui des calculateurs (Mitra 15 ou Hewlett Packard 9830 A).

b. La centrale d'acquisition de données Bruyère

Ce système d'acquisition de données permet de collecter les informations analogiques ou numériques provenant de différents capteurs. Il permet l'enregistrement de 30 voies de mesure avec calcul de la moyenne de chaque voie sur des intervalles de temps variable (10 minutes à 2 heures). Les informations sont transcrites sur une imprimante.

Les signaux analogiques sont transmis à travers un convertisseur numérique à une unité de contraction des données qui est reliée à une imprimante par l'intermédiaire d'une logique de commande.

Les 30 voies sont scrutées par l'intermédiaire de relais. Le convertisseur analogique numérique a une résolution de $1 \mu\text{V}$ et seules les dizaines de microvolts sont prises en compte (précision des mesures meilleure que $10 \mu\text{V}$).

La centrale est munie d'une horloge numérique avec affichage par diodes électroluminescentes. L'unité de contraction des données est composée d'un sommateur et d'une unité mémoire de 30 mots de 24 bits, les moyennes sont calculées à la fin de chaque période de mesures choisie. L'unité de sortie des informations effectue le transcodage et l'organisation des mots imprimés sur papier.

Les données ainsi transcrites sur imprimante ont ensuite été transposées sur cassette informatique. Le traitement a été effectué à l'aide d'un calculateur Hewlett Packard 9830 A relié à une table traçante.

L'organigramme de la chaîne d'acquisition et de traitement de données est représenté sur la figure 1.7.

Notre rôle dans ce domaine des techniques de mesures microclimatiques a essentiellement consisté à :

- Choisir un matériel parfaitement adapté aux mesures sur le terrain,
- Constituer avec la collaboration du STEFCE* d'Avignon une chaîne d'acquisition et de traitement de données cohérente allant des différents capteurs microclimatiques à la sortie graphique.

Le choix des capteurs a été déterminé essentiellement par leurs caractéristiques techniques (précision, seuil de mesures...), celles-ci devant être compatibles avec les objectifs recherchés. Notre rôle ici a également consisté à contrôler et intercomparer les capteurs (corrélation entre anémomètres ou entre thermosondes par exemple). Cette intercomparaison étant un préalable indispensable à l'utilisation des capteurs pour la détermination des écarts microclimatiques.

Les systèmes d'acquisition de données ont été choisis de façon à être autonomes, légers, insensibles aux variations des conditions extérieures d'utilisation.

Nous avons également choisi le matériel de mesures et d'acquisition de données par sa facilité de mise en oeuvre et de contrôle sur le terrain ainsi que pour son utilisation possible dans différentes configurations de protocoles expérimentaux.

* STEFCE : Service Technique d'Etudes des Facteurs Climatiques de l'Environnement de l'INRA.

CHAINE D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DES DONNEES

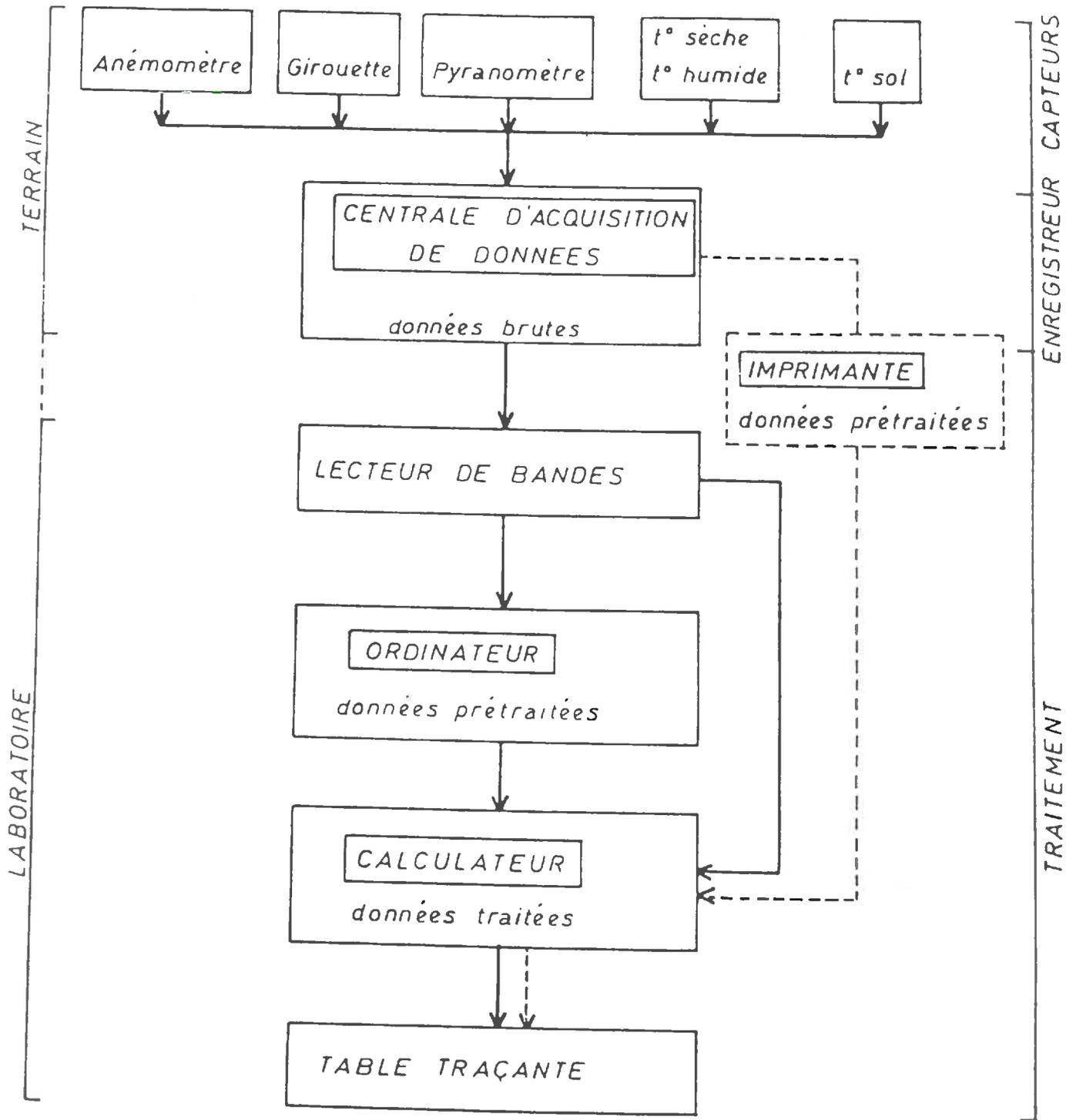


Figure 1.7.
Organigramme de l'acquisition et du traitement des données

1.4. CONCLUSIONS

Dans cette première partie, nous avons présenté les principes généraux qui régissent les échanges d'énergie contribuant à la formation des microclimats des milieux agricoles. Dans une zone plane et homogène et en l'absence d'obstacles les variations microclimatiques sont essentiellement fonction de l'altitude. De l'interaction des différentes composantes du bilan radiatif et des échanges d'énergie mécanique résulte la distribution verticale des paramètres climatiques.

Les gradients sont d'autant plus importants que l'on se trouve près des surfaces d'échanges (sol, sommet du couvert végétal..), mais aussi que la vitesse du vent est faible, les apports radiatifs importants et la teneur en eau disponible faible. La détermination de ces gradients microclimatiques, constitue une base importante dans l'analyse du fonctionnement des écosystèmes.

Par ailleurs, l'analyse fine des mécanismes d'échanges d'énergie a nécessité la mise en oeuvre de matériels adaptés aux mesures et à l'acquisition des différents paramètres climatiques sur le terrain.

Ce sont ces méthodes et ces techniques de mesures qui ont permis l'analyse de la formation des microclimats de milieux agricoles hétérogènes caractérisés par la présence de structures arborescentes.

II. LE MICROCLIMAT DE L'ARBRE

Dans ce chapitre et les suivants seront présentés et discutés les résultats expérimentaux que nous avons obtenus à trois échelles d'espace différentes : celle d'un arbre, celle d'un couvert forestier et celle d'une parcelle agricole entourée de haies. Pour chaque échelle, nous présenterons un bref rappel théorique sur les particularités des échanges énergétiques entrant en jeu puis nous analyserons les variations microclimatiques observées lors d'expériences entreprises pour étudier les relations entre certains phénomènes biologiques (bactériose, pullulation d'insectes,...) et le climat.

Notre analyse portera à la fois sur les répartitions spatiales (profils microclimatiques verticaux et transects horizontaux) et sur les évolutions dans le temps des distributions microclimatiques au cours de journées caractéristiques correspondant à des situations météorologiques très différenciées. Cette échelle de temps a été choisie de façon à mettre en évidence les écarts entre les paramètres microclimatiques pour des niveaux très différents du bilan radiatif selon l'heure de la journée. Au cours d'une journée et à chaque instant, il est ainsi possible de "photographier" et d'analyser la formation des microclimats.

Les mécanismes relatifs à la croissance et au développement des arbres ainsi que ceux qui déterminent les conditions de développement de certaines de leurs maladies parasitaires résultent des interactions entre les caractéristiques biologiques du végétal et les conditions physiques du milieu environnant. Au niveau de la plante, l'écorce apparaît, durant la période hivernale, comme une surface d'échange entre l'arbre et l'atmosphère mais aussi comme le lieu d'implantation de microorganismes parasites (virus, bactéries, champignons) dont le développement

dépend des caractéristiques des échanges d'énergie de l'écorce (VERBRUGGHE, 1975,1979 ; VIGOUROUX, 1979). Compte tenu du double rôle joué par l'écorce, comme surface d'échange et comme lieu de prolifération de parasites, nous nous proposons d'analyser les variations de la température d'écorce d'arbres fruitiers en soulignant l'importance relative des différents facteurs climatiques.

Nous nous sommes efforcés dans toutes ces expérimentations de centrer notre analyse sur la température de surface ou la température mesurée au niveau du cambium, zone de croissance du végétal et substrat sur lequel se développent les parasites. Une étude a d'abord été menée dans un verger à proximité du domaine expérimental de l'INRA de Montfavet, elle avait pour but de déterminer les variations de température de surface le long d'un tronc ou à un niveau donné selon différentes orientations ou encore de comparer les températures de rameaux avec celles mesurées de façon classique en agrométéorologie. Deux expériences ont ensuite été entreprises d'une part en Ardèche, région particulièrement touchée par le dépérissement des pêchers par la bactériose et également dans la basse vallée du Rhône (région de cultures fruitières) au domaine expérimental de Gotheron (Drôme) où notre étude a plus spécialement été orientée sur l'influence de la peinture blanche sur les variations de température de troncs d'abricotiers.

2.1. BILAN D'ENERGIE D'UN ELEMENT VEGETAL

Si l'on se place à l'échelle d'un élément végétal (feuille, tige), l'équation du bilan d'énergie peut s'écrire :

$$R_n + \Phi_H + \Phi_L + MC \frac{dT}{dt} = 0 \quad (2.1.)$$

Alors que l'équation (1.1.) considèrait des flux moyens dans le temps ou des flux instantanés en régime permanent, l'équation (2.1.) décrit les échanges énergétiques instantanés. Le terme $MC(dT/dt)$ représente la variation de la quantité de chaleur qui est stockée dans un élément végétal.

Si la variation de la température est suffisamment lente, le terme $MC(dT/dt)$ voisin de zéro peut être négligé (M : masse de l'organe végétal, C : chaleur massique de l'organe). De même, si on considère un rameau, en l'absence de pluie ou de rosée son écorce transpire très peu et le terme Φ_L peut généralement être négligé.

Dans ces conditions l'équation (2.1.) peut s'écrire :

$$R_n + \Phi_H = 0 \quad (2.2.)$$

La température prise par une branche dépendra donc essentiellement de son bilan radiatif et de ses échanges thermiques par convection, c'est-à-dire de la vitesse du vent.

En effet, le terme Φ_H peut s'écrire :

$$\Phi_H = - h (T_s - T_a) = - \rho \frac{C_p}{r_a} (T_s - T_a) \quad (2.3.)$$

avec

T_s : Température de surface de l'élément végétal,

T_a : Température de l'air au niveau de l'élément végétal,

ρ : Masse spécifique de l'air, ρ à $0^\circ\text{C} = 1.239 \text{ kg m}^{-3}$

C_p : Chaleur spécifique de l'air à pression constante, $1000 \text{ J kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

r_a : Résistance aérodynamique à la diffusion de la chaleur. (s.m^{-1})

Le terme r_a peut être déterminé à partir de l'équation du profil de vitesse (1.1.) (profil logarithmique).

donc Φ_H peut s'écrire :

h : coefficient d'échange turbulent

$$\Phi_H = - \frac{\rho C_p k^2 U}{[\ln(z/z_o)]^2} (T_s - T_a) \quad (2.4.)$$

avec

k : constante de von Karman

z : hauteur au dessus du sol

z_o : paramètre de rugosité

U : vitesse du vent

D'après cette équation, on voit donc que Φ_H est directement proportionnel à la vitesse du vent U .

En combinant les équations (2.2.) et (2.4.), on obtient :

$$T_s - T_a = \frac{R_n [\ln(z/z_o)]^2}{\rho C_p k^2 U} \quad (2.5.)$$

Nous voyons ainsi qu'à un niveau donné, l'écart des températures entre un rameau et l'air est inversement proportionnel à la vitesse du vent. C'est ce que nous avons essayé de vérifier.

2.2. ANALYSE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE D'UN TRONC D'ARBRE FRUITIER

La température de surface d'un tronc peut être considérée, à chaque instant, comme la résultante du bilan de ses échanges d'énergie. Outre les variations temporelles, il est intéressant d'analyser les variations spatiales de la température d'écorce de façon à préciser l'ordre de grandeur des variations thermiques observées à l'échelle d'un arbre. Il est ainsi possible d'établir une cartographie de température de surface et de suivre son évolution en fonction de l'heure de la journée, de l'orientation de l'écorce ou de la hauteur au-dessus du sol.

2.2.1. L'expérimentation

Nous avons mesuré les températures d'écorces de cerisier, sur le domaine expérimental de l'INRA à Montfavet, et de pêcher dans des vergers en Ardèche. Nous avons utilisé des thermocouples ou des thermorésistances en platine pour les mesures en continu et un thermomètre électronique de contact pour des mesures par sondage (la précision de ces mesures est de $\pm 0,1^\circ\text{C}$).

Les capteurs étaient placés sous l'écorce, l'enregistrement des données se faisant à l'aide d'enregistreurs potentiométriques ou du système d'acquisition de données BRUYERE. La répartition des capteurs sur l'arbre et la fréquence de scrutation des capteurs étaient définies en fonction des objectifs recherchés.

La meilleure méthode pour mesurer la température d'une surface végétale, sans modifier ses conditions de fonctionnement consiste à mesurer le rayonnement thermique qu'elle émet. Cependant, cette technique nécessite l'utilisation d'un matériel peu adapté aux mesures permanentes sur le terrain et à la prise en compte de surfaces de petites dimensions comme les rameaux d'arbres fruitiers. C'est la raison pour laquelle nous avons renoncé à utiliser cette technique dans nos expériences.

2.2.2. Influence de l'orientation

Les variations de températures d'écorce d'un tronc d'arbre fruitier en fonction de l'orientation ont été analysées à partir de mesures effectuées avec des thermocouples cuivre - constantan. Ils étaient implantés sur le tronc d'un cerisier de 0,25 m de diamètre à 1 m du sol selon les orientations nord, sud, est et ouest. Le cerisier sur lequel étaient faites les mesures était situé au centre d'un verger planté depuis 5 ans sur le domaine de l'INRA à Montfavet (altitude 24 m, latitude 48,79 N grades, longitude 5,49 E grades). Les résultats expérimentaux présentés (figure 2.1.) sont relatifs à une journée de beau temps, le 22 août 1974, dont les composantes du bilan radiatif ont été mesurées à proximité du verger expérimental (figure 2.2.).

Le matin, les surfaces exposées à l'est et au sud ont des températures très proches et sont plus chaudes que celles exposées à l'ouest et au nord. Les écarts sont de l'ordre de 5° C à 7 heures et de 3 à 4,5° C à 12 heures*. L'après-midi, on observe une réduction des écarts, les températures des surfaces exposées à l'est et au sud décroissent tandis que celles des surfaces exposées à l'ouest et au nord continuent de croître jusqu'à 17 heures. Les effets du rayonnement solaire direct sur la température d'écorce sont ici mis en évidence ;

* Les heures figurant dans ce texte correspondent à des heures T.U.

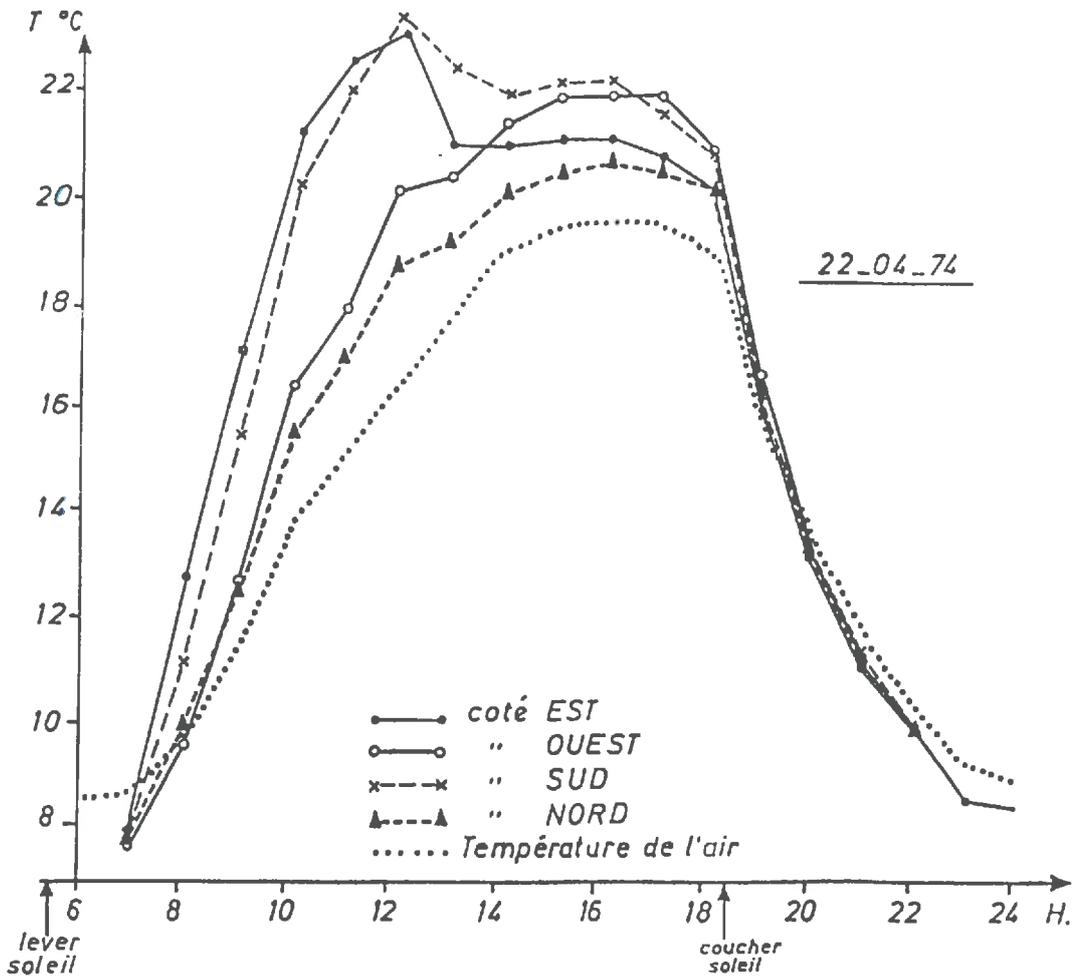


Figure 2.1.
Variation journalière de la température d'écorce d'un tronc de cerisier mesurée à 1 m au dessus du sol, selon différentes orientations

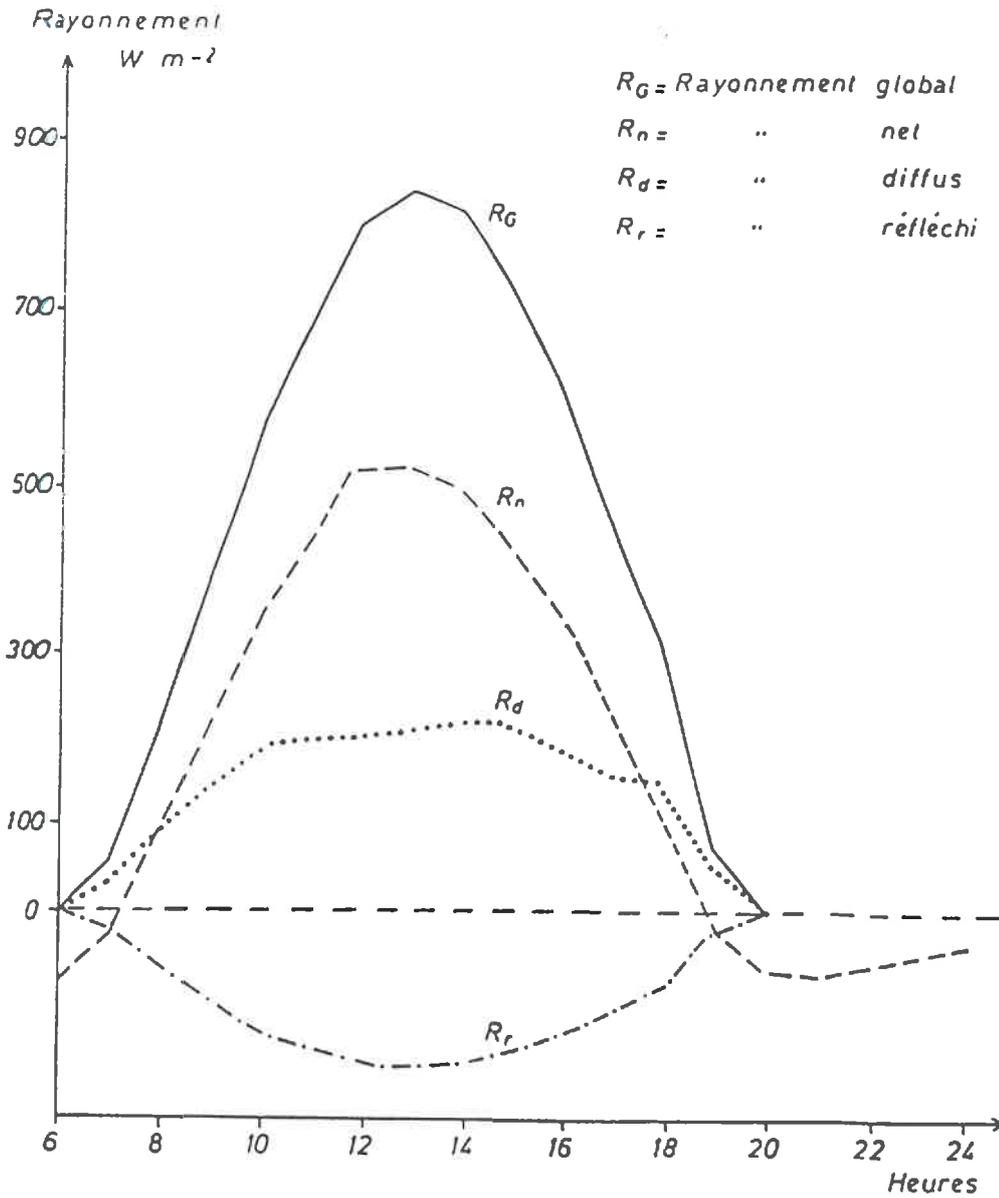


Figure 2.2.
Composantes du bilan radiatif (mesurées sur le domaine expérimental de l'INRA, à Montfavet le 22 avril 1974)

en l'absence de rayonnement solaire (après 18h 30), les températures sont identiques quelle que soit l'exposition ($\Delta T \approx 0,1^\circ \text{C}$). La dissymétrie entre les températures du matin et celles de l'après-midi s'explique par les variations de hauteur apparente du soleil. Le matin, les côtés est et sud du tronc absorbent le rayonnement direct et diffus alors que les côtés ouest et nord ne sont influencés que par le rayonnement diffus. L'après-midi, le rayonnement solaire direct provoque une élévation de température du côté ouest du tronc ce qui explique l'augmentation continue de la température d'écorce pour cette orientation depuis le matin jusqu'au coucher du soleil (18h30). Par contre, les côtés sud et est ont des températures qui décroissent lentement à partir de 12 heures, l'apport radiatif du rayonnement direct disparaissant peu à peu. L'équilibre thermique des zones d'écorce orientées au sud et à l'est résulte alors des gains énergétiques provenant du rayonnement diffus et des pertes par rayonnement de l'énergie absorbée par l'écorce durant la matinée.

Après le coucher de soleil, on observe une chute rapide de l'ensemble des températures. L'absence de rayonnement solaire provoque une homogénéisation et une décroissance de l'écorce qui restitue par rayonnement l'énergie absorbée depuis le lever du soleil.

Ces résultats confirment ceux observés sur les températures de zones cambiales de chênes (GEIGER, 1966).

2.2.3. Gradients verticaux de températures de surface

Les mesures de température de surface que nous avons effectuées étaient destinées à déterminer à un instant donné l'importance des écarts thermiques pouvant exister à un instant donné le long d'un tronc de cerisier.

L'exploration a été faite toutes les heures à l'aide d'un thermomètre de contact au cours d'une journée de beau temps (22/04/74) et de vent modéré ($1,2 \text{ m.s}^{-1}$ à 2 m du sol). Les points de mesures étaient répartis tous les 0,3 m

sur le tronc depuis 0,05 m jusqu'à 1,5 m sur l'écorce exposée au soleil et à 0,05 m et 1,5 m sur l'écorce orientée à l'ombre. Par ailleurs la température de l'air était mesurée à l'aide d'une thermosonde placée dans une prise ventilée située à proximité du cerisier et à 1,5 m au dessus du sol.

Les évolutions des températures des surfaces exposées au soleil sont représentées sur la figure 2.3. Les courbes de températures sont sensiblement parallèles, elles s'ordonnent en fonction de la hauteur au-dessus du sol, les températures les plus élevées sont celles de la base du tronc, les températures du sommet étant plus basses. L'écart maximal mesuré entre le sommet et la base du tronc atteint 5,3° C à 12 heures.

Pour un tronc vertical et cylindrique, si l'on admet que les éléments d'une même génératrice ont un bilan radiatif indépendant de la hauteur, l'équation (2.5.) nous indique qu'alors l'écart $T_s - T_a$ dépendra principalement de la vitesse du vent. La vitesse du vent a donc été calculée pour chaque niveau de mesure à partir de la vitesse mesurée à 2m su sol (1.2 m s^{-1}) et du paramètre de rugosité du sol $Z_o = 0,01 \text{ m}$ (tableau 2.1).

Z_m	$U \text{ m s}^{-1}$	$T_s \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_s - T_a \text{ (}^\circ\text{C)}$
0,05	0,10	29,3	12,3
0,30	0,42	29	12
0,60	0,66	27	10
0,90	0,85	26	9
1,20	1,0	25	8
1,50	1,1	24,6	7,6

Tableau 2.1

Variations verticales de la vitesse du vent (U) des températures de surface du tronc (T_s) mesurées à différentes hauteurs et des écarts $T_s - T_a$. T_a étant la température de l'air mesurée dans une prise ventilée à 1,5 m au dessus du sol, le 22.04.74 à 12H30.

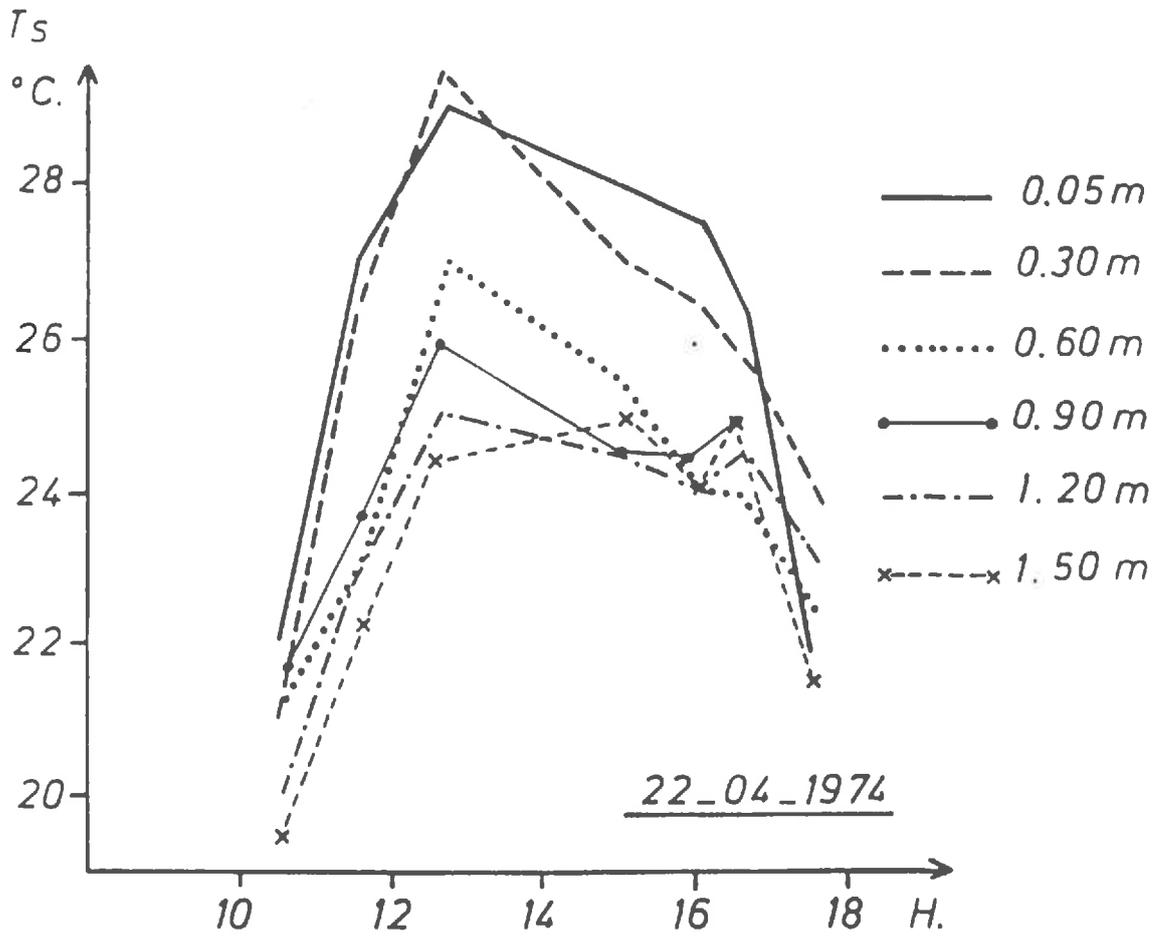


Figure 2.3.
Variation des températures moyennes de surface de l'écorce du tronc d'un cerisier au cours d'une journée et à différentes hauteurs au-dessus du sol

Sur la figure 2.4., nous avons représenté l'écart $T_s - T_a$ en fonction de la vitesse du vent à un instant donné (12h30). T_a étant la température de l'air mesurée au même instant à 1,5 m au dessus du sol à proximité du cerisier. Il existe, à un instant donné, une relation de type linéaire entre l'écart $T_s - T_a$ et la vitesse du vent. La relation suivante a ainsi été trouvée :

$$T_s - T_a = 13 - 5,15 u \quad (r = 0,95)$$

On remarque que les points correspondants aux mesures faites à 0,05m et 0,30m au dessus du sol s'écartent légèrement de la droite. Ceci peut s'expliquer par la proximité du sol qui modifie les échanges radiatifs et aussi parce qu'il n'est pas certain que la loi logarithmique utilisée pour représenter le profil de vitesse puisse être appliquée aussi près du sol.

Ceci souligne l'intérêt de disposer de mesures de vitesse de vent, de températures de l'air et de températures de surface faites de façon simultanées et aux mêmes niveaux pour analyser de façon précise les échanges d'énergie qui se produisent à cette échelle.

La figure 2.5 représente les plages de variations des températures de surface au cours d'une journée entre 0,05m et 1,5 m pour les côtés du tronc exposés au soleil et à l'ombre. Ces résultats soulignent l'importance du rayonnement direct sur l'amplitude des variations des températures de surface.

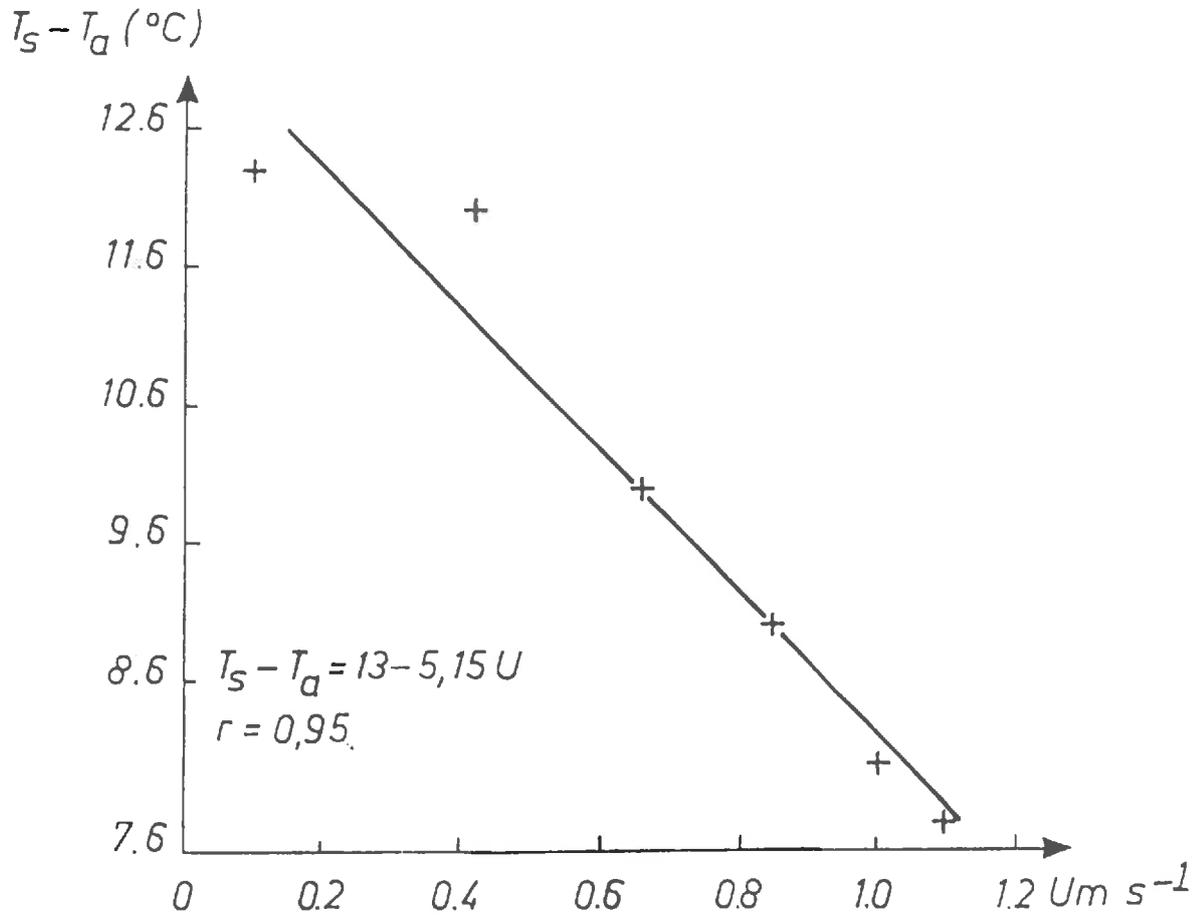


Figure 2.4.

Relation à un instant donné entre les écarts $T_s - T_a$ et la vitesse du vent U . T_s et U sont mesurés aux mêmes niveaux. T_a est mesurée à 1.5 m au dessus du sol.

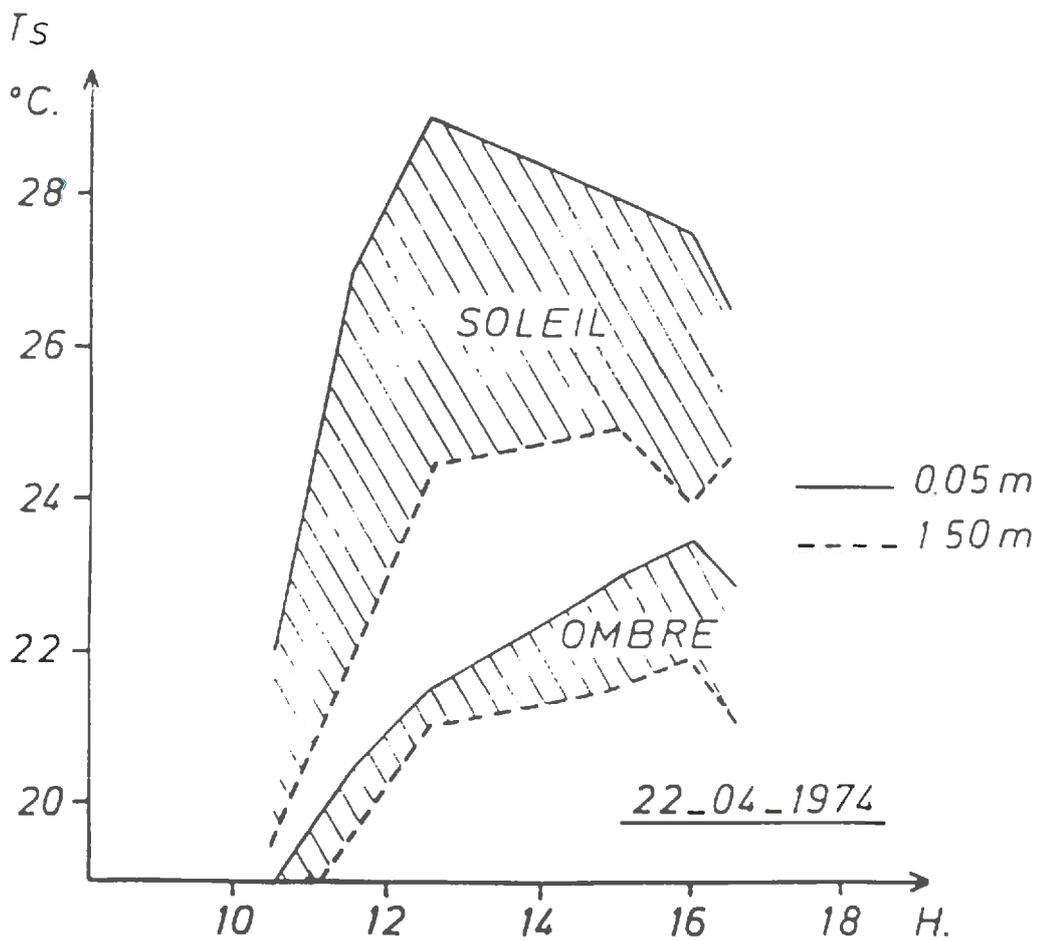


Figure 2.5.

Variations des températures des parties à l'ombre et au soleil sur le tronc d'un cerisier. Les zones hachurées représentent les plages de variations des températures mesurées à 1,5 m et 0,05 m au dessus du sol sur les surfaces du tronc exposées à l'ombre et au soleil.

Ils confirment ceux présentés au paragraphe précédent et soulignent le rôle du rayonnement solaire direct sur la température d'écorce. On note cependant un décalage entre les températures mesurées par thermocouples sous l'écorce et la température de surface mesurée avec le thermomètre de contact. Si les variations des températures au cours de la journée sont parallèles, il existe un décalage entre les résultats obtenus à l'aide de ces deux méthodes de mesures. La température mesurée sous l'écorce est en effet plus basse que celle mesurée à la surface de l'écorce ($\Delta T \approx 4$ à 5°C). Ceci traduit l'absorption énergétique due à l'écorce c'est la mesure faite sous l'écorce qui sera à prendre en compte dans toute étude relative aux processus biologiques se produisant au niveau du cambium

2.3. INFLUENCE DE LA COULEUR DU TRONC SUR LA TEMPERATURE DE SURFACE

La technique du blanchiment des troncs d'arbres fruitiers est utilisée de façon à protéger les variétés sensibles aux attaques de chancres bactériens (abricotiers, cerisiers...). L'objectif recherché est double, il s'agit d'une part de modifier le bilan énergétique du tronc en augmentant son albédo de façon à diminuer l'amplitude thermique journalière et, d'autre part assurer une protection phytosanitaire par l'adjonction de produits bactéricides (VERBRUGGHE, 1978). Nous nous proposons d'analyser ici les effets de cette technique culturale sur la modification des températures de surface des troncs.

2.3.1. Protocole expérimental

L'expérimentation a été réalisée durant les mois de février et mars 1977 dans la vallée du Rhône au domaine de Gotheron (altitude 190 m, latitude $49,92$ N grades, longitude $5,48$ E grades).

Les mesures ont été effectuées sur deux troncs d'abricotiers âgés de six ans et ayant de 0,25 m de diamètre. L'un était peint en blanc (la peinture était constituée d'un mélange de 2/3 de blanc pâteux et d'1/3 de peinture vinylique renfermant principalement une charge vinylique, du talc, du carbonate de calcium et de l'oxyde de titane), l'autre n'était pas traité. Ils étaient situés au centre du verger et sur un sol enherbé. Les mesures de température ont été effectuées à l'aide de microthermistances (type FENWALL) de 1 mm de diamètre, la précision de ces capteurs est de $\pm 0,1^{\circ}$ C.

Ces microcapteurs étaient introduits à l'intérieur d'une aiguille de 1,5 mm de diamètre et placés sous l'écorce au niveau de la zone cambiale tangentiellement à la surface des troncs. Les thermistances étaient implantées à 0,30 m du sol. La température de l'air était mesurée à l'aide d'une thermo-résistance placée à proximité des arbres et à 1,6 m au-dessus du sol (niveau du poste météorologique) à l'intérieur d'une tuyère ventilée. Les mesures étaient enregistrées sur une centrale d'acquisition de données Aandera.

Les températures ainsi mesurées ne peuvent pas être comparées directement aux températures de surface analysées dans le paragraphe précédent. Cependant, leurs variations sont parallèles (transmission de la chaleur par conduction). Le niveau 0,3m a été choisi car il correspond à celui où se développent principalement les maladies.

2.3.2. Présentation générale des résultats expérimentaux

Les variations journalières de la température de l'air mesurée dans la tuyère ventilée à 1,6m au dessus du sol et celles des troncs peints et non peints ont été comparées pour l'ensemble de la période de mesures à l'aide des données recueillies toutes les 10 minutes.

Il existe un rythme quotidien des écarts aussi bien pour les arbres peints que non peints mais la température minimale des troncs est légèrement inférieure à celle de l'air alors que la température maximale est très nettement supérieure.

Les températures maximales des troncs peints et non peints sont toujours supérieures à celle de l'air. L'écart maximal est observé entre les températures du tronc non peint et celles de l'air, il peut atteindre 17° C (figure 2.6a. et 2.6b.).

Les températures minimales de l'air et celles des troncs peints et non peints sont très proches ($\Delta T < 1,5^\circ \text{C}$). L'amplitude thermique journalière est ainsi plus importante pour le tronc non peint que pour le tronc peint par suite de l'abaissement des températures maximales diurnes.

Les températures diurnes des arbres non peints sont toujours supérieures à celles des arbres peints, l'écart maximal de jour atteint fréquemment 8° C lors de journées de beau temps (figure 2.6.c). La nuit, les températures minimales des troncs peints et non peints ne sont jamais significativement différentes ($\Delta T < 0,2^\circ \text{C}$). L'effet de modification de l'albédo par la peinture blanche n'étant sensible que dans les domaines visible et proche infrarouge. L'émissivité de la peinture dans l'infrarouge thermique est voisine de 1 si bien que les échanges radiatifs nocturnes des troncs peints et non peints sont identiques. Selon les conditions météorologiques, la diminution d'amplitude thermique sera faible les journées de ciel couvert (17 et 22 février) ou très importante (7 à 8° C) les journées de ciel clair (25, 26 février) (figure 2.6b.).

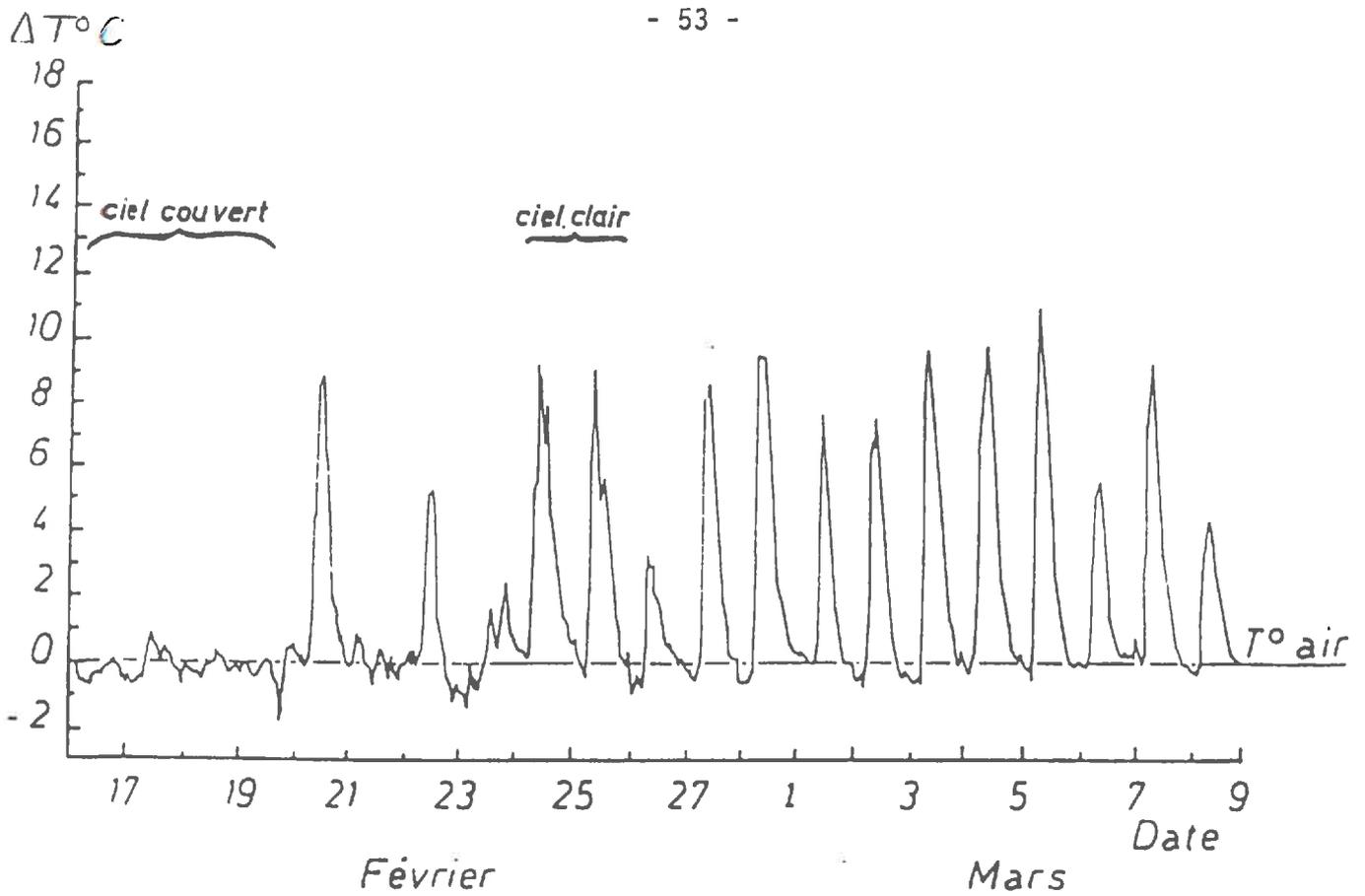


Figure 2.6a.
Evolution des écarts entre la température de l'air mesurée à 1,6 m au dessus du sol (référence) et la température d'un tronc peint durant la période hivernale (février et mars 1977).

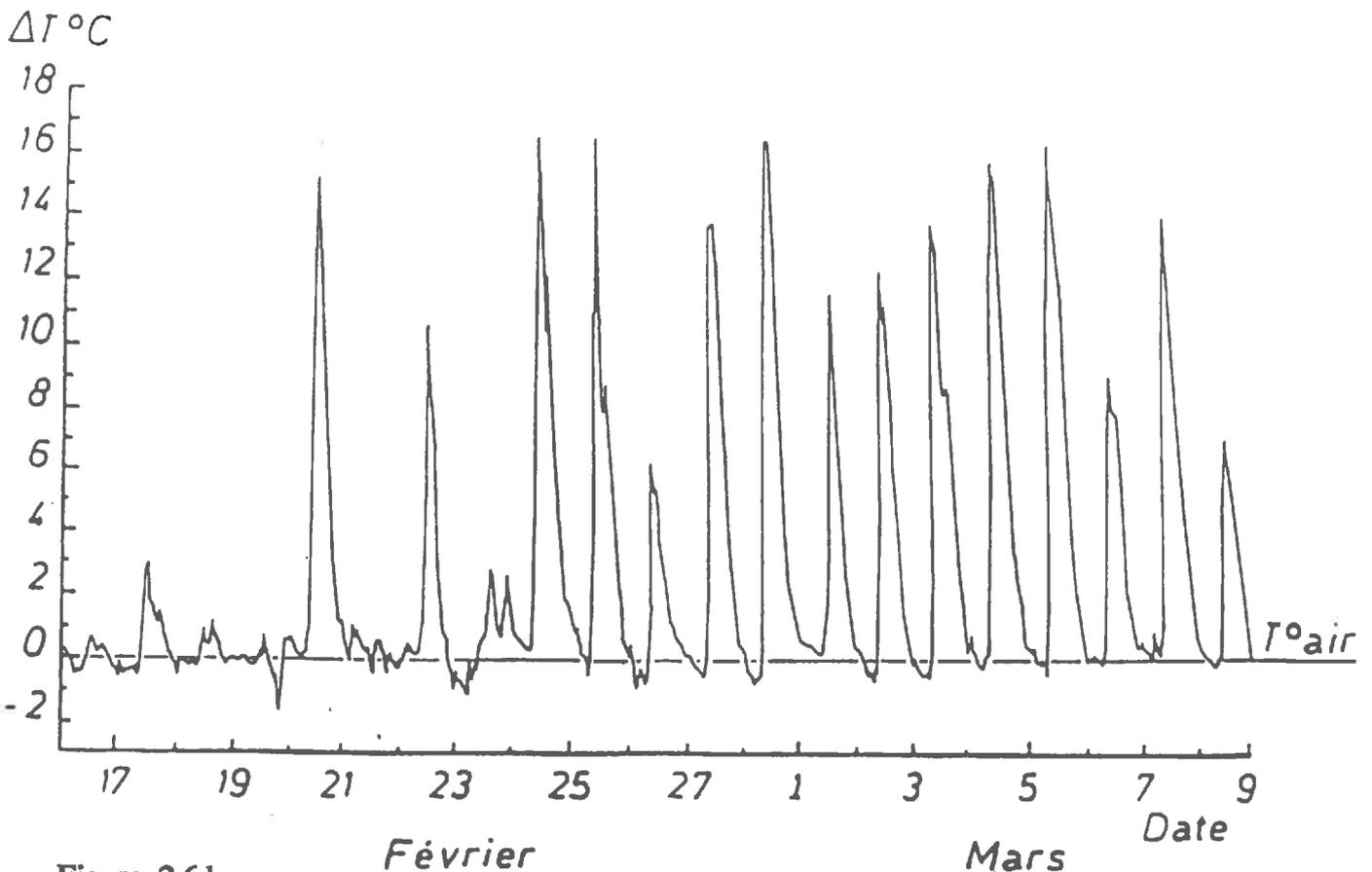


Figure 2.6.b
Evolution des écarts entre la température de l'air mesurée à 1,6 m au dessus du sol (référence) et la température d'un tronc non peint durant la période hivernale (février mars 1977)

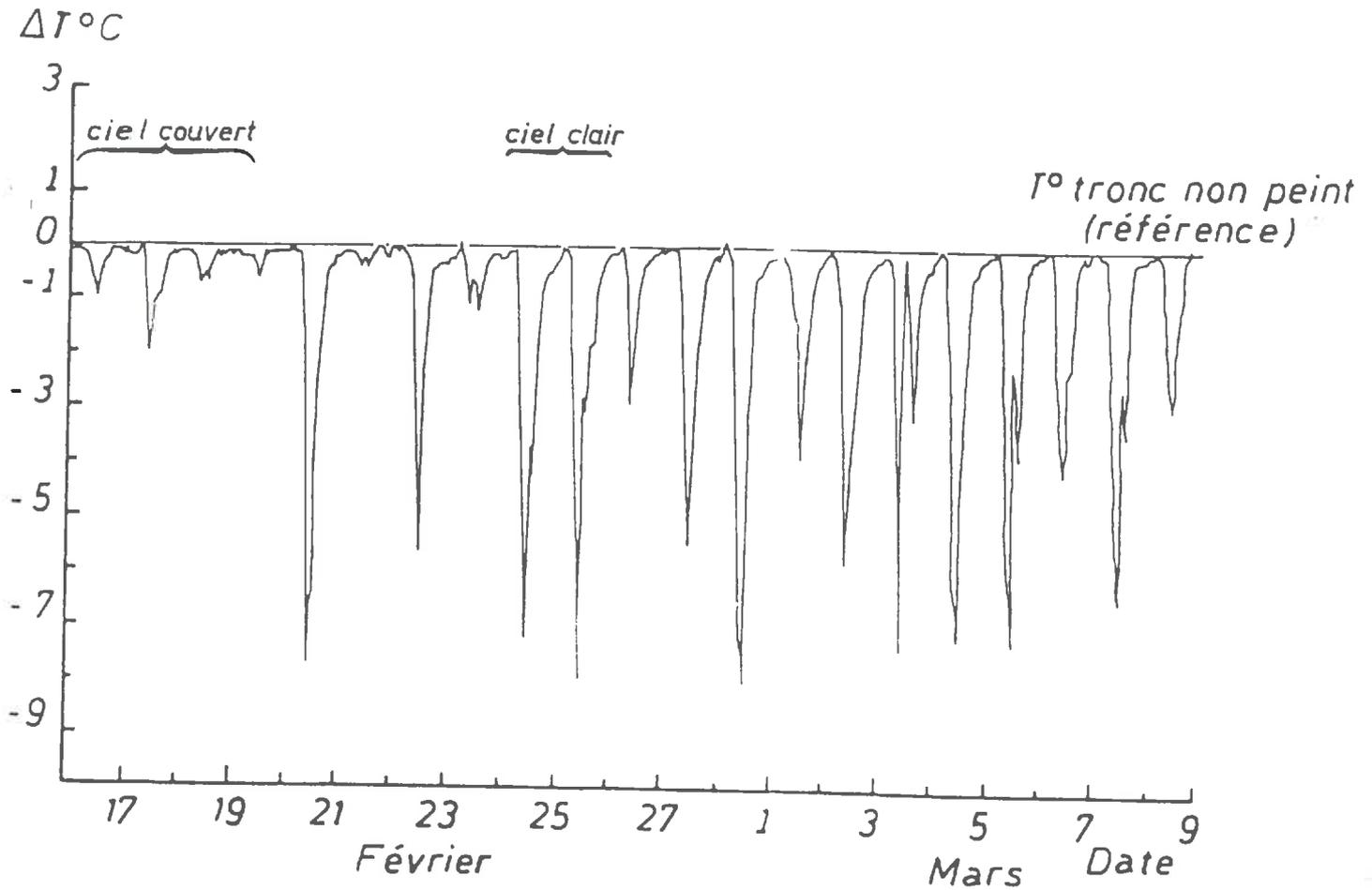


Figure 2.6c.
Evolution des écarts entre les températures d'un tronc non peint (référence) et celle d'un tronc peint

Si nous considérons la relation (2.5.), elle peut se mettre sous la forme simplifiée :

$$T_s - T_a = \frac{A \times R_n}{U} \quad (2.6.)$$

A est une constante, dans notre cas particulier (mesures sur 2 troncs identiques, au même instant et au même niveau au-dessus du sol).

Si nous appelons T_{sp} , la température sous l'écorce du tronc peint et T_{snp} , la température sous l'écorce du tronc non peint, nous pouvons écrire :

$$T_{snp} - T_{sp} = \frac{A}{U} (R_{nnp} - R_{np}) \quad (2.7.)$$

R_{np} et R_{nnp} étant les bilans radiatifs des troncs peints et non peints.

Nous pouvons remplacer R_n par sa définition (équation 1.2.) :

$$R_n = (1 - a) R_{gt} + R_a - R_t$$

avec

R_t : Rayonnement émis par le tronc,

R_{gt} : Rayonnement global reçu par le tronc (cylindre vertical).

$$T_{sp} - T_{snp} = \frac{A}{U} [R_{gt}(a_p - a_{np}) + (R_{tp} - R_{tnp})]$$

Si l'on admet que le terme $(R_{tp} - R_{tnp})$ est petit devant le terme $R_{gt}(a_p - a_{np})$ car il peut être estimé à 5 à 10 % de celui-ci, on obtient alors la relation simplifiée :

$$T_{snp} - T_{sp} = \frac{A R_{gt}}{U} (a_p - a_{np}) \quad (2.8.)$$

par conséquent, l'écart de température entre le tronc peint et le tronc non peint doit varier linéairement en fonction du rapport R_{gt}/U . C'est ce que nous avons essayé de tester.

La figure 2.7. représente la variation de écart $T_{snp} - T_{sp}$ en fonction du rayonnement global (reçu sur une surface horizontale) déterminé à partir de la durée d'insolation (mesurée au parc météorologique du domaine Gotheron). Cette valeur ne correspond donc pas au rayonnement global R_{gt} reçu par le tronc mais lui est sensiblement proportionnelle car les mesures ont été effectuées durant une période de 23 jours au cours de laquelle la hauteur du soleil a relativement peu varié. La figure 2.7, présente la relation entre $(T_{snp} - T_{sp})$ et R_g . L'expression analytique suivante a été trouvée

$$T_{snp} - T_{sp} = 0,47 R_g - 1,05 \quad (r = 0,83) \quad (2.9.)$$

Cependant, quelques points s'écartent nettement. Ce désaccord est certainement dû au fait que les écarts de températures entre les troncs ont été mesurés au moment du maximum de température alors que le rayonnement global est intégré sur l'ensemble de la journée. L'introduction de la vitesse du vent n'améliore pas la corrélation (figure 2.8.) car elle a été elle-même intégrée sur des périodes de 24 heures.

$$T_{snp} - T_{sp} = 0,84 R_g/U + 0,24 \quad (r = 0,73) \quad (2.10.)$$

Cette analyse des résultats expérimentaux montre que l'écart de températures entre les troncs dépend bien du rayonnement solaire reçu et de la vitesse du vent ; mais les données météorologiques dont nous disposons ne nous permettent pas d'établir une relation précise entre les données climatiques et l'écart de température entre les troncs. Il serait possible d'améliorer ces expressions analytiques en mesurant de façon simultanée et sur le même intervalle de temps (heure ou 10 minutes), le rayonnement arrivant sur un plan vertical, les températures de surfaces, et la vitesse du vent. Ceci pose le problème de l'utilisation de données mesurées de façon classique en agrométéorologie pour l'interprétation précise de données bioclimatiques.

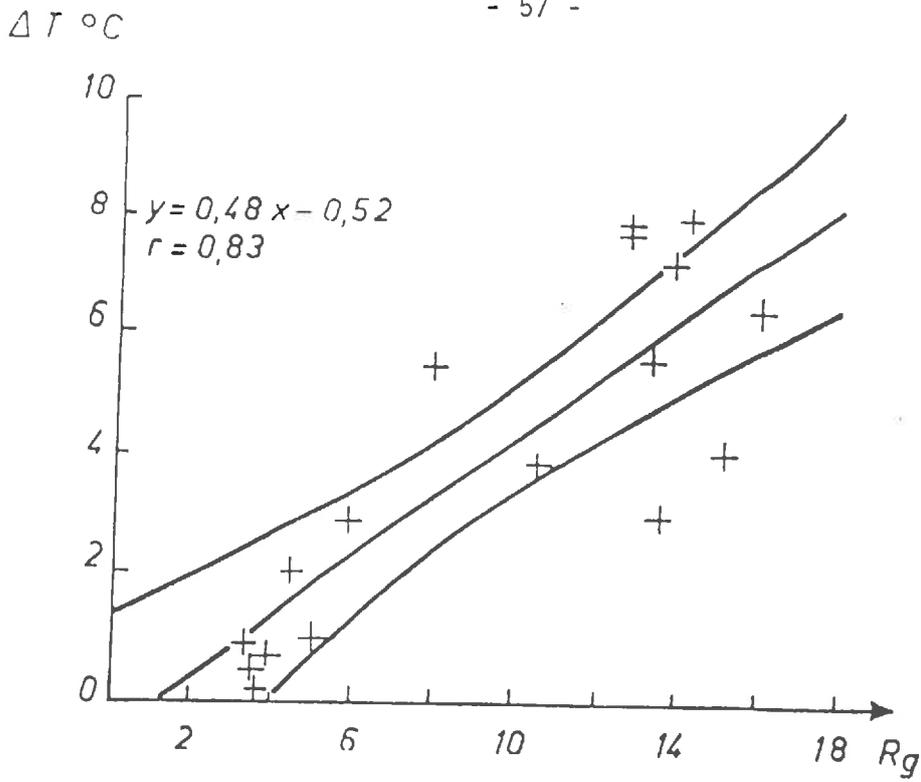


Figure 2.7.
Relation entre l'écart des températures des troncs non peints et peints (ΔT) mesuré au moment du maximum de température et le rayonnement global R_g de la journée.

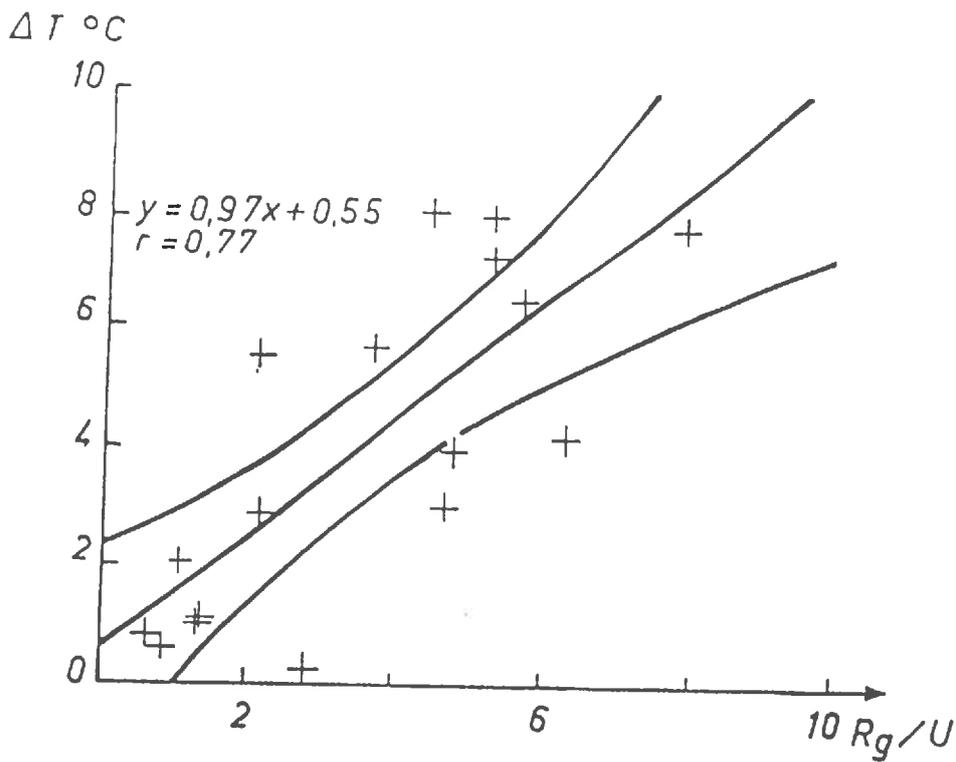


Figure 2.8.
Relation entre l'écart des températures des troncs non peints et peints (ΔT) mesuré au moment du maximum de température et le rapport entre le rayonnement global R_g et la vitesse du vent U mesurés sur 24 heures.

Par ailleurs, nous avons effectué une analyse fréquentielle des écarts de températures entre les troncs peints et non peints à partir de 3 116 données recueillies toutes les 10 minutes durant la période de mesure (17 février au 11 mars 1977). Cette analyse (figure 2.9.) montre que :

- Dans 95 % des cas les températures des arbres non peints sont supérieures à celles des arbres peints ;
- La médiane se situe au niveau de la classe 0 à + 1° C (66 % des mesures) ;
- La classe des écarts extrêmes + 4° C à + 5° C représente 2 % des mesures.
- Les écarts négatifs ne sont représentés que dans la classe 0 à - 1° C où se situent 5 % des mesures.

L'analyse de fréquences des écarts de températures entre les troncs peints et non peints au moment du maximum (entre 12 et 13 heures) de chaque journée (figure 2.10a) met en évidence des températures d'arbres peints toujours plus basses que les températures d'arbre non peint. On observe une répartition bimodale des écarts, chaque mode correspondant à des conditions météorologiques différentes. De façon schématique, on peut dire que le mode centré sur la classe 0 à - 1° C correspond aux situations de ciel couvert et que le mode centré sur la classe - 6° à - 7° C correspond aux situations de ciel clair.

Ces situations de ciel clair et de ciel couvert sont très fréquentes dans la vallée du Rhône (tableau 2.2).

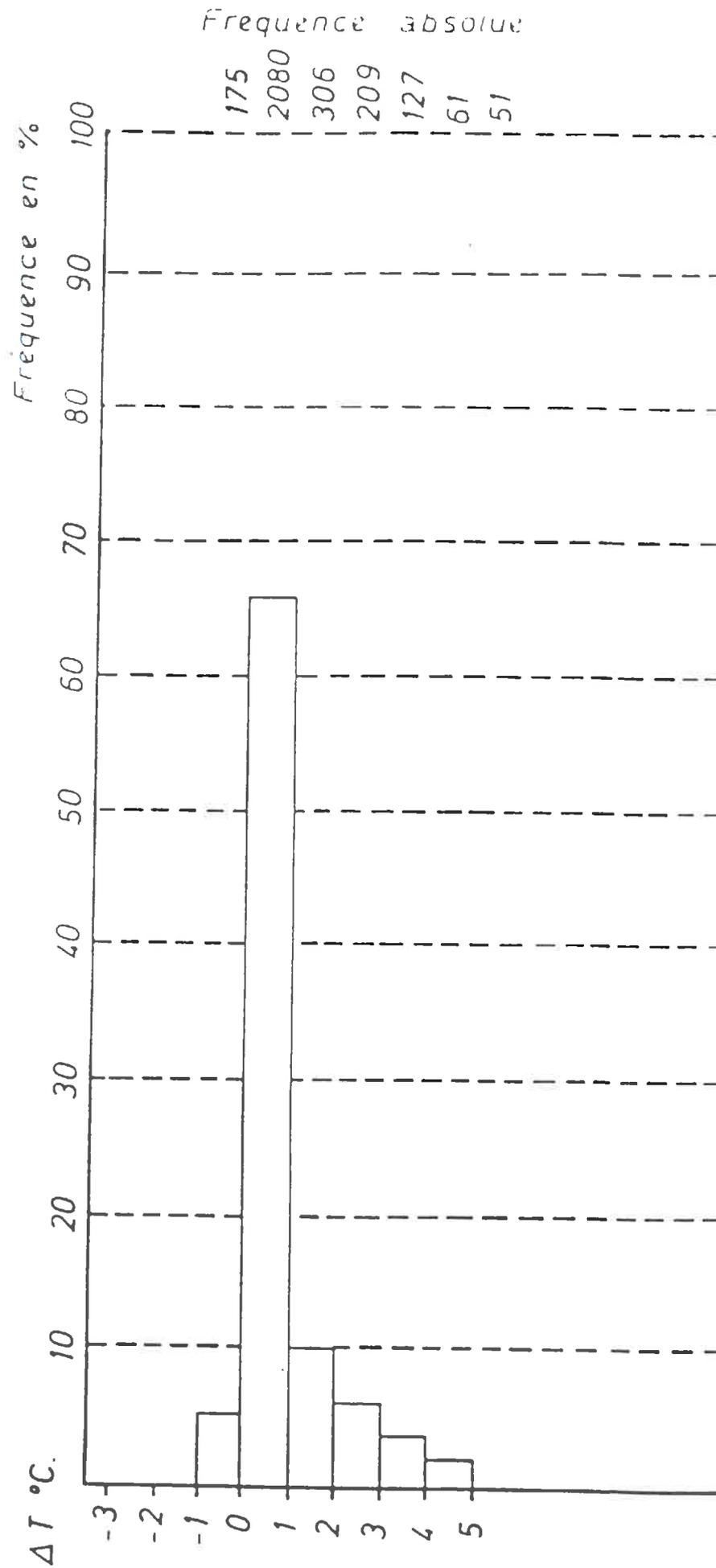


Figure 2.9.
Histogramme de fréquence des écarts de températures entre les troncs peints et non peints

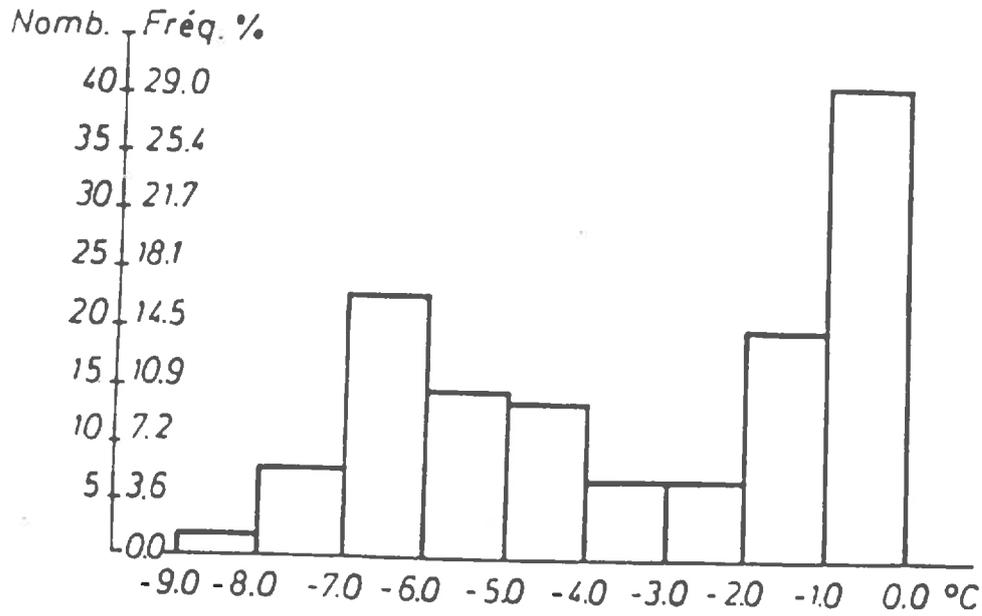


Figure 2.10a.
Histogramme de fréquence des écarts de températures (arbre peint, arbre non peint) au moment du maximum

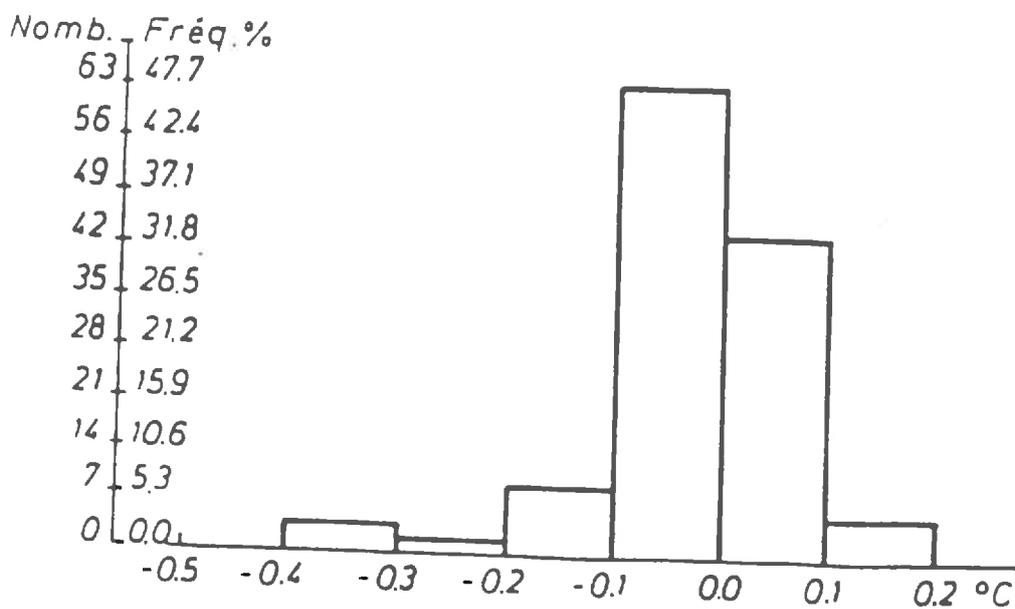


Figure 2.10b.
Histogramme de fréquence des écarts de températures (arbre peint, arbre non peint) au moment du minimum

Stations	F > 70%	F < 10%
GOTHERON 1971 – 1987	27%	34%
CARPENTRAS 1971 – 1980	45%	21%
AVIGNON 1968 – 1987	47%	23%

Tableau 2.2 : Fréquence des jours en février et mars où la fraction d'insolation est supérieure à 70 % et inférieur à 10 % pour 3 stations météorologiques situées dans la vallée du Rhône : GOTHERON et AVIGNON (Stations INRA) et CARPENTRAS (Station Météorologie Nationale)

Au moment du minimum de températures (entre 6 et 7 heures), les écarts entre arbres peints et non peints sont très faibles (figure 2.10b.), la médiane de l'histogramme se situe dans la classe 0° à - 1° C avec 48 % des observations, 89 % des observations étant comprises entre - 0,1° C et + 0,1° C. La répartition est ici unimodale, l'effet du rayonnement solaire en fonction du type de temps, n'intervenant pas au moment où se produit le minimum.

Les résultats observés sont analogues à ceux cités dans la littérature (MARTSOLF et al., 1975) avec cependant des écarts inférieurs dûs à des conditions climatiques où l'amplitude thermique journalière est moins accentuée.

2.3.3. Analyse de l'évolution des température à l'échelle de la journée

Cas d'une journée de ciel clair

Lors d'une journée de ciel clair, (figure 2.11 a) il est possible de distinguer deux périodes bien distinctes : une période nocturne où les températures de surface des troncs peints et non peints sont égales et une période diurne où les températures sont d'autant plus différenciées que le ciel est clair (ou ensoleillé). La nuit, la peinture qui n'est blanche que dans le visible et le proche infrarouge se comporte comme une peinture noire dans l'infra-rouge thermique et par suite ne modifie pas les températures de surface de l'arbre. La période diurne est caractérisée par un réchauffement plus rapide et plus intense de l'arbre non peint dont la surface de couleur sombre, absorbe davantage le rayonnement solaire. La température maximale de l'arbre non peint se produit deux heures plus tôt, au moment du maximum de rayonnement solaire ou peu après elle est dans l'exemple présenté supérieure de 6° C à celle de l'arbre peint.

Cas d'une journée de ciel couvert

Par temps couvert, les températures des troncs peints et non peints ne sont pas significativement différentes quelle que soit l'heure de la journée (figure 2.11b.).

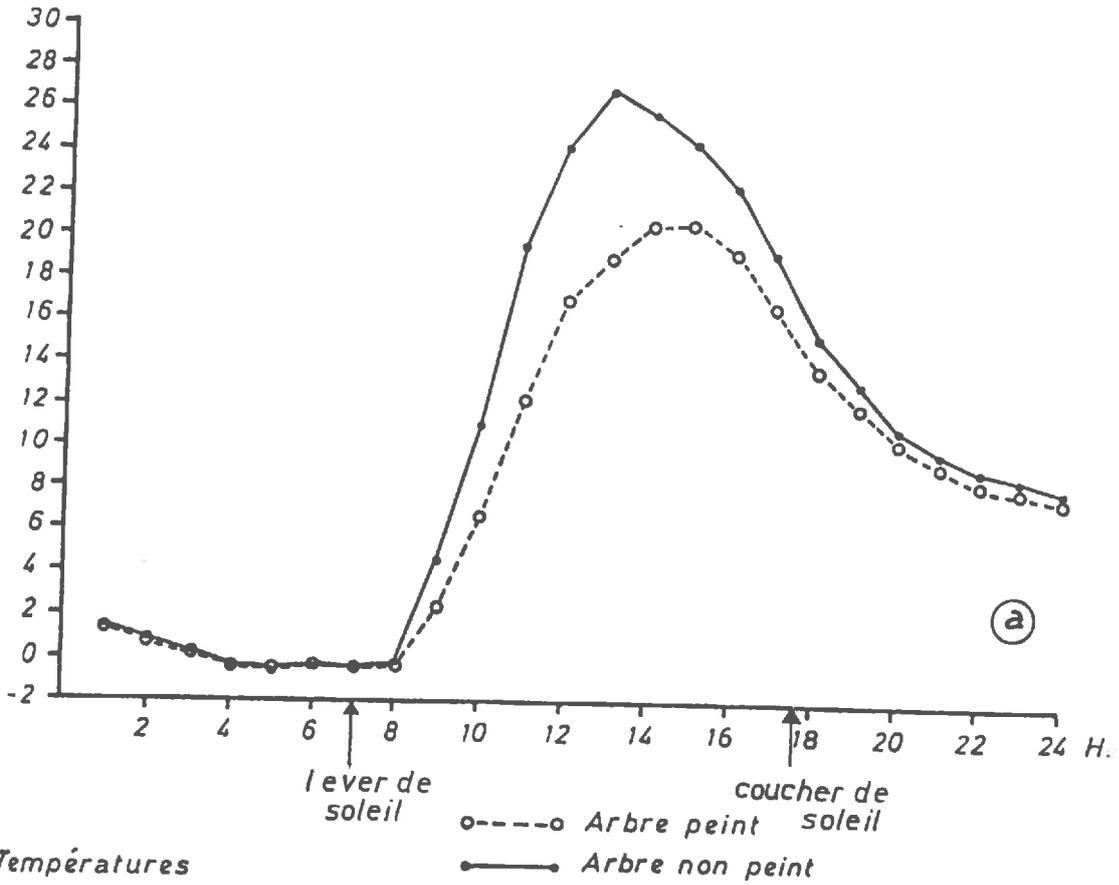
Ceci traduit bien l'influence du rayonnement solaire sur les écarts de températures observés pour les deux types de surface.

Cas d'une situation de gel nocturne

La comparaison des températures d'écorce des arbres peints et non peints lors d'une journée de gel (température minimale sous abri météo - 1,9° C) confirme l'absence d'effet de la peinture blanche sur les températures nocturnes les écarts thermiques observés entre les deux troncs ne sont pas significatifs (figure 2.12.) et la protection contre le gel inexistante.

Températures

°C.



Températures

°C.

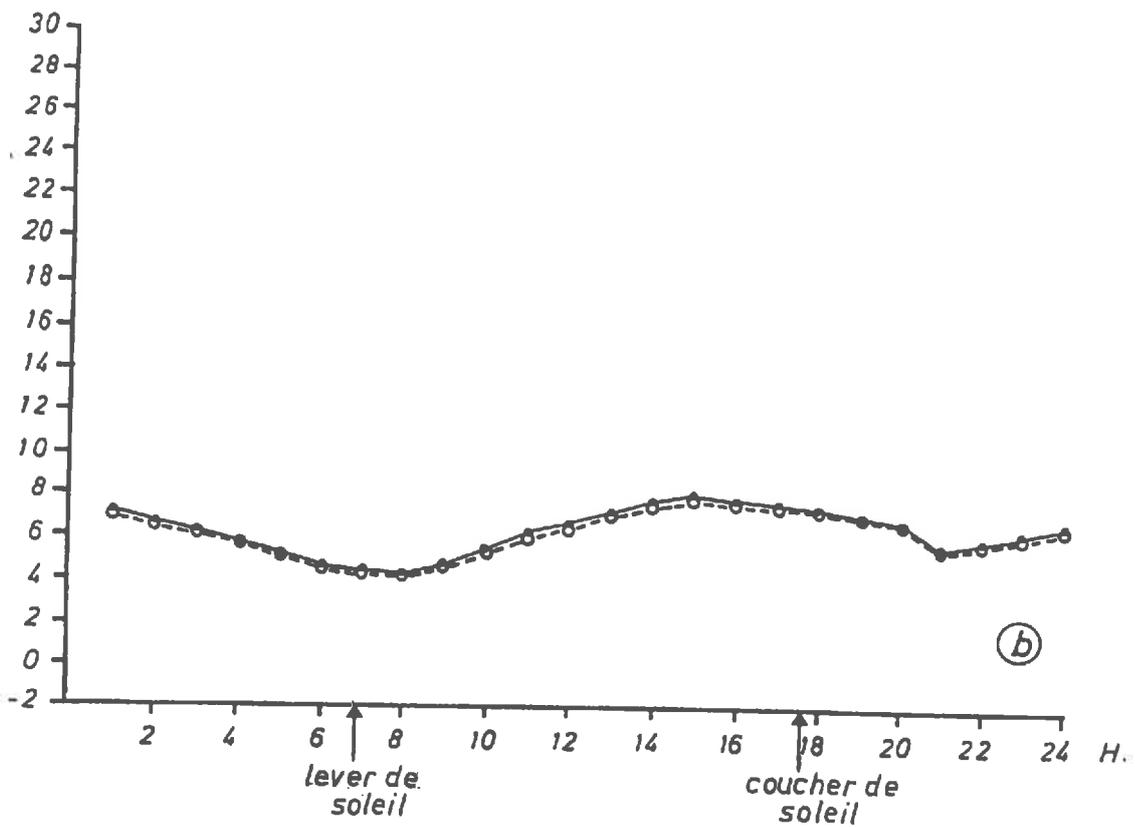


Figure 2.11.

Evolution des températures moyennes horaires des troncs peints et non peints lors d'une journée de ciel clair 1/03/1977 (a) et de ciel couvert 22/02/1977 (b)

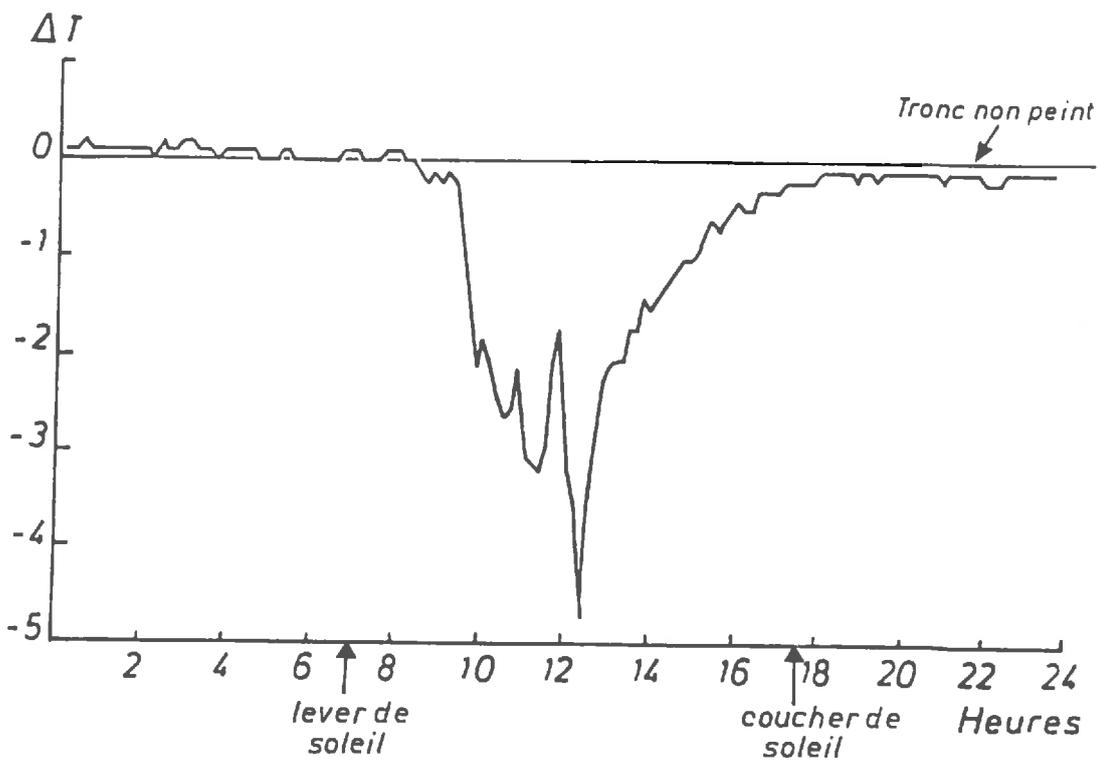


Figure 2.12.
Evolution journalière de l'écart des températures moyennes horaires entre le tronc peint et le tronc non peint (référence) lors d'une journée de gel (03/02/1977)

Ainsi le blanchiment des troncs n'a aucun effet direct sur la protection contre le gel lorsque celui-ci se produit la nuit. Par contre, en limitant l'amplitude thermique journalière, il peut réduire les risques de lésions des tissus végétaux provoquées par les variations de diamètre du tronc (GEIGER, 1966).

2.4. TEMPERATURE INTERNE D'UN RAMEAU

Deux expérimentations ont été effectuées : l'une à Avignon sur les rameaux d'un cerisier et l'autre en Ardèche sur des pêchers.

Ces expériences avaient pour but :

- De déterminer la relation existant entre la température prise par un rameau et les températures mesurées de façon classique en agrométéorologie,
- D'analyser la variabilité des températures de rameau dans un verger en fonction des conditions météorologiques.

2.4.1. Comparaison de la température d'un rameau avec les températures mesurées en agrométéorologie

La température interne du rameau a été déterminée sur un cerisier à Montfavet à l'aide d'une thermo-résistance de platine ($0,4 \Omega \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Nous avons retenu un rameau se trouvant à 1 m du sol et ayant un diamètre de 5 mm environ. Il était sectionné à la suite de la taille et nous avons percé un trou de 3 mm de diamètre dans la zone médulaire. Il restait donc un fourreau de 1 mm d'épaisseur constitué par l'écorce et le cambium qui entourait la sonde température (figure 2.13). Celle-ci, ainsi placée au contact des tissus végétaux, prenait une température d'équilibre voisine de celle de la partie centrale du rameau.

Nous avons comparé cette mesure à celle d'une sonde identique placée en indice actinothermique, à une prise de température ventilée placées au même niveau (1 m) et à la température mesurée sous abri météorologique à 2 m au-dessus du sol.

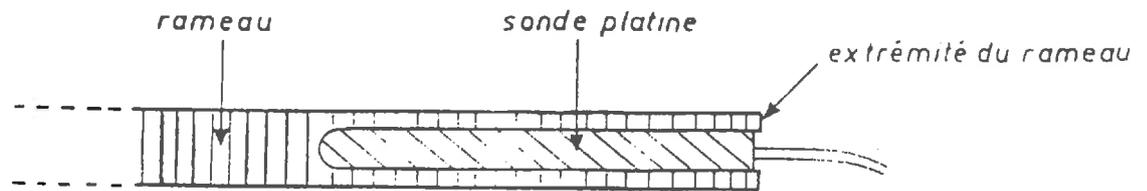


Figure 2.13 : Schéma d'implantation d'une sonde dans un rameau

Comme les mesures ont été effectuées durant la période de repos végétatif (février, mars), et en l'absence de pluie, le flux d'évaporation, à partir des rameaux est voisin de zéro. L'écart entre la température du rameau et celle de l'air dépend donc de son bilan radiatif et de la vitesse du vent. D'après l'équation 2.6., nous voyons que le rameau aura une température plus élevée que celle de l'air lorsque son bilan radiatif sera positif (jour) et une température plus basse que celle de l'air lorsque son bilan radiatif sera négatif (nuit). La figure 2.14 montre l'évolution des différentes températures au cours d'une belle journée. La vitesse d'évolution des températures est la plus élevée pour le rameau et la plus faible pour l'air sous abri météorologique. L'écart entre le rameau et l'indice actinothermique est dû essentiellement à la différence d'albédo des deux récepteurs. Le rameau a un albédo de l'ordre de 0,15 dans le visible, alors que la sonde en verre est transparente et donc absorbe peu le rayonnement solaire visible et proche infrarouge. La sonde placée dans une prise ventilée donne une température encore plus faible car elle est protégée du rayonnement (elle mesure la température de l'air). La température de l'air mesurée sous abri a une amplitude plus amortie car elle est déterminée à 2 m au-dessus du sol et avec des conditions de ventilation généralement plus faibles et moins stables que celles qui existent dans une prise ventilée.

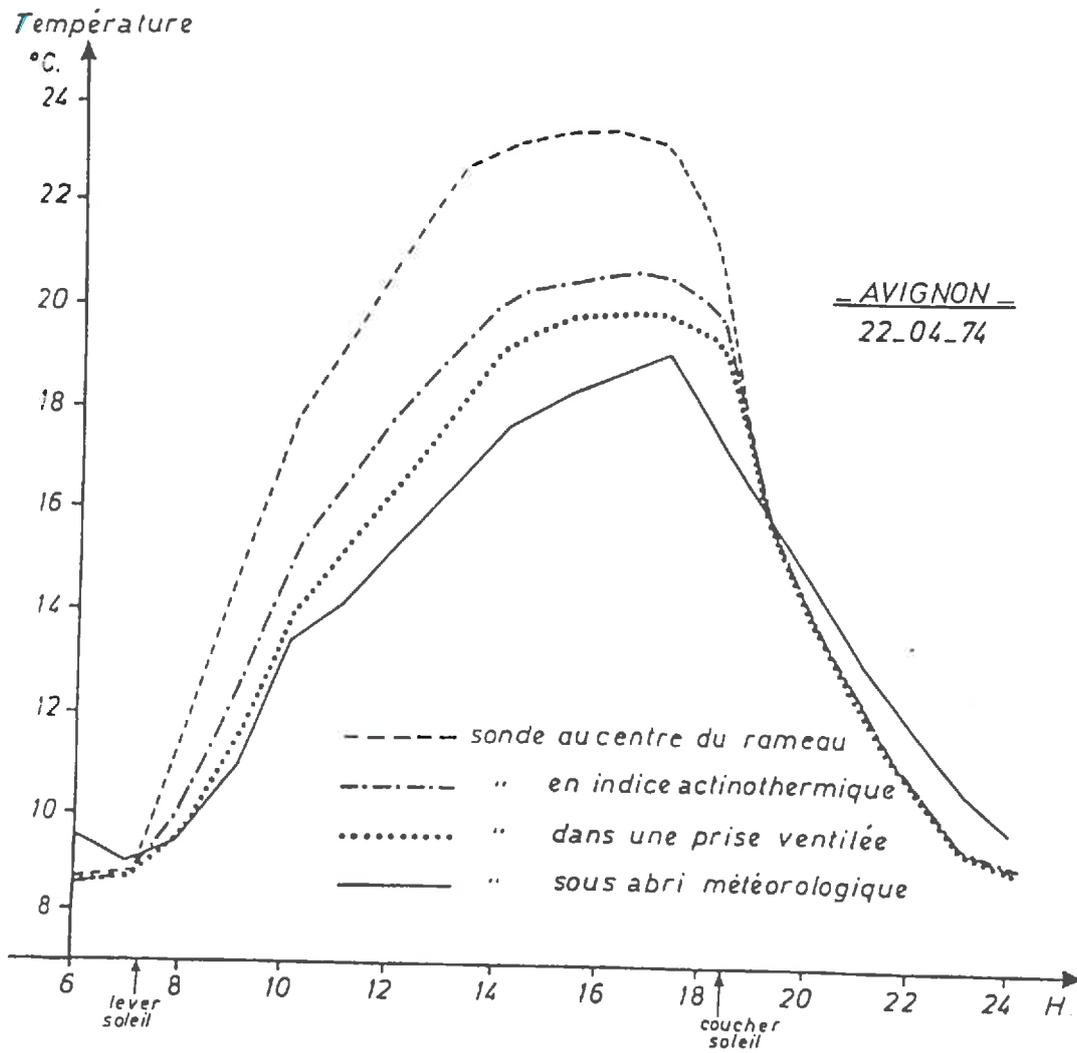


Figure 2.14
Evolution journalière des températures sous écorce et de températures mesurées dans différentes conditions

Ces résultats montrent que la température de l'air ou la température en indice actinothermique ne peuvent pas être utilisées directement pour décrire la température d'un rameau. Il faut donc soit développer un modèle qui décrive la relation existant entre la température d'un rameau et celle de l'air, soit utiliser une mesure différente des mesures classiques ; la plus simple consistant à placer la sonde dans un rameau ou un manchon simulant un rameau.

2.4.2. Influence des conditions météorologiques sur la variabilité des températures de rameaux d'arbres fruitiers

Nous avons vu que l'écart de température entre un rameau et l'air dépendait essentiellement de son bilan radiatif et de la vitesse du vent (équation 2.6.). L'étude que nous avons effectuée était destinée à analyser la variabilité des températures prises par différents rameaux dans un verger en fonction des conditions météorologiques.

2.4.1.1. Protocole expérimental

L'étude expérimentale a été réalisée en Ardèche sur le territoire de la commune de Colombier-le-Jeune (altitude 700 m, latitude 50,10 N, longitude 5,22 E). Cette région a été choisie parce que particulièrement exposée au développement de la bactériose du pêcher.

Le verger expérimental est constitué par de jeunes pêchers (variété JH Hale) de 1,5 m de haut taillés en gobelets. Ce verger de forme carrée couvre une surface d'environ 2 ha sur un versant légèrement incliné vers le Nord, entouré par des paturages au Nord et par une sapinière, dont la hauteur moyenne est d'environ 8 m, sur les autres côtés.

Les températures de rameaux ont été mesurées durant l'hiver (janvier et février 1975) à l'aide de sondes platines implantées (comme indiqué au paragraphe 2.4.1) au centre de rameaux. 10 sondes ont ainsi été disposées à 1 m du sol dans des rameaux de pêchers situés sur un même rang.

Les rameaux ont été choisis de façon à ce que les conditions de mesures soient aussi semblables que possible (âge, orientation et position des rameaux identiques). Les sondes étaient implantées à la partie méridionale de l'arbre de façon à éviter l'ombre des autres branches à l'emplacement des mesures.

L'influence relative du vent et du rayonnement sur la variabilité des températures a été analysée pour différentes conditions météorologiques :

- Situation de hautes pressions avec pénétration d'un front froid d'origine nordique. Cette situation se caractérise localement, en Ardèche, par un ciel clair avec passages nuageux et un vent de secteur nord modéré.

- Situation de hautes pressions centrées sur l'Europe. Cette situation donne naissance à un fort vent de secteur sud mais avec un ciel généralement dégagé.

- Situation de basses pressions sur l'Atlantique nord. Cette situation donne également naissance à un fort vent de secteur sud mais avec un ciel couvert.

2.4.2.2. Analyse des résultats expérimentaux

Les températures moyennes horaires de rameaux ont été comparées, pour chacune des situations météorologiques, aux moyennes horaires des températures de l'air mesurées à l'aide d'une sonde à résistance de platine sous abri météorologique à 2 m au dessus du sol. La dispersion des mesures a été caractérisée par l'écart type des températures horaires des dix sondes.

Ciel clair et vent modéré de secteur Nord

Les résultats présentés pour une journée correspondant à ce type de temps où le rayonnement global intégré sur la journée est de $13,7 \text{ MJ.m}^{-2}$ et la vitesse du vent de $2,9 \text{ m.s}^{-1}$ mettent en évidence une différence significative entre l'évolution des températures de l'air sous abri et celles des rameaux (figure 2.15a.). Le maximum relevé sous abris est inférieur de 3° C à celui mesuré dans le rameau, le minimum est supérieur de 1° C . Il existe à la fois une différence de vitesse d'évolution des températures et une différence d'amplitude thermique, l'explication de cette disparité a été donnée précédemment (paragraphe 2.4.1.).

La variabilité des mesures de températures de rameaux dépend de l'heure de la journée, les fluctuations sont importantes durant la nuit et une partie de la matinée, elles sont plus faibles le reste de la journée.

Les variations brutales de l'intervalle de confiance (1 à 10) la nuit, peuvent s'expliquer par une répartition inégale de la condensation sur les rameaux et une évolution variable du réchauffement des rameaux liés probablement à des périodes de calme et de coups de vent. On peut noter ici l'intérêt de disposer de données agrométéorologiques à une échelle de temps inférieure à 24 heures pour interpréter de façon précise ce type d'observation. Il aurait été ici intéressant de connaître la vitesse moyenne du vent nocturne et diurne.

Ciel clair et vent faible de secteur Sud

Pour une journée représentative de ce type de temps ($R_g = 13,7 \text{ MJ.m}^{-2}$, $U = 1,6 \text{ m.s}^{-1}$), les résultats obtenus (figure 2.15b.) confirment ceux précédemment décrits : l'amplitude thermique journalière est plus faible sous abri météorologique que dans les rameaux (maximum inférieur de 3° C et minimum supérieur de 2° C) ; l'inertie thermique de l'abri et son niveau plus élevé que celui des rameaux se traduisent par un décalage de 1 heure de la température maximale.

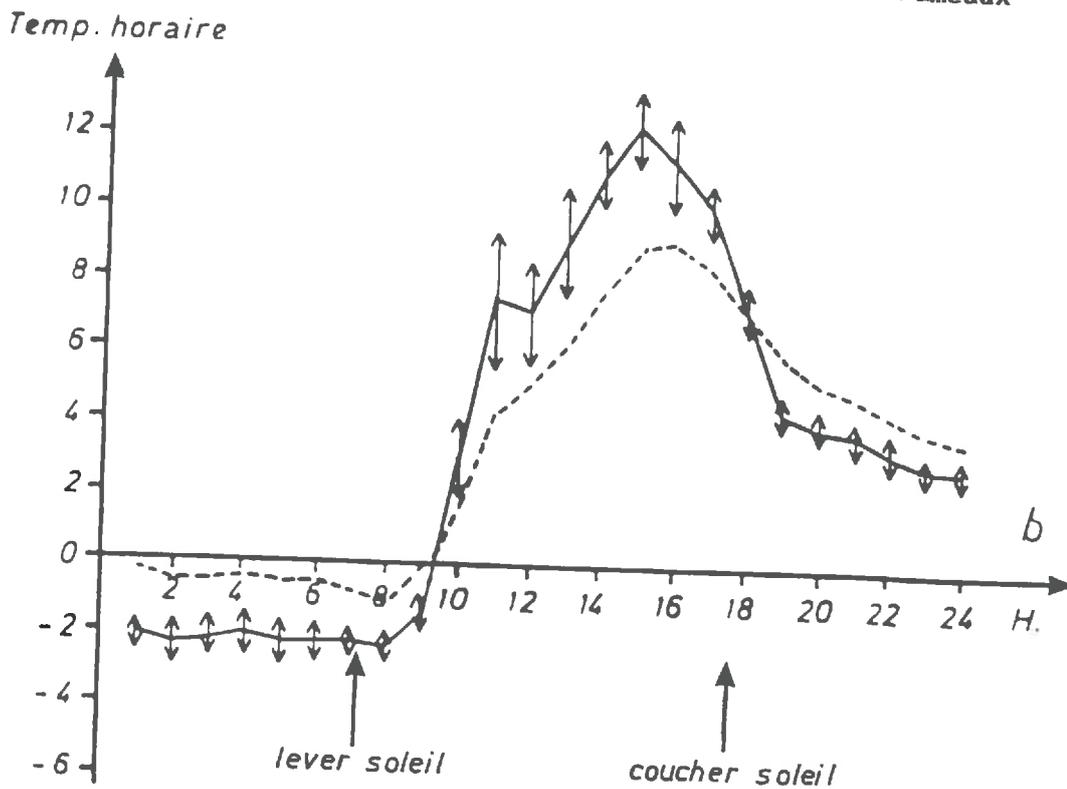
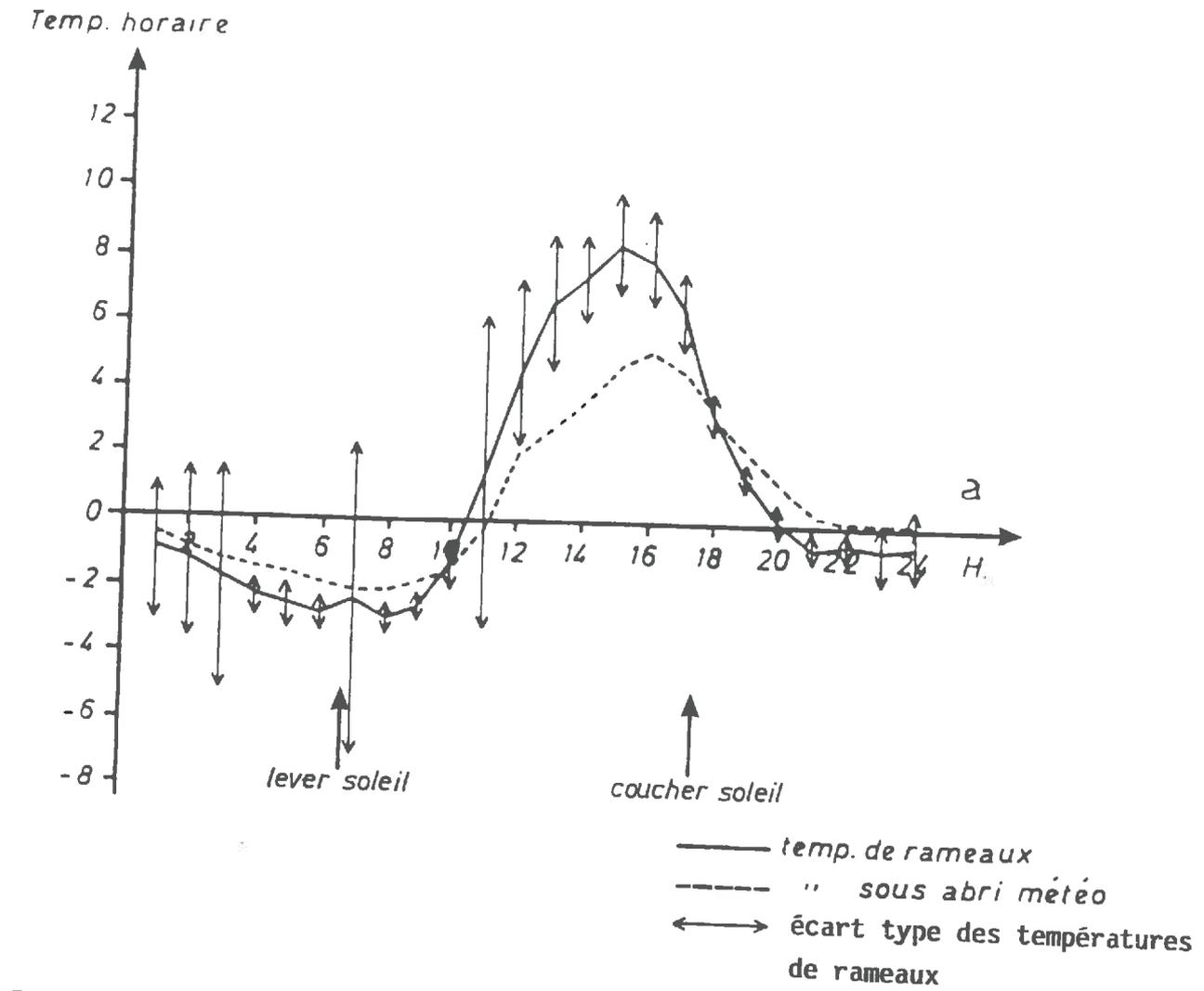


Figure 2.15.
Evolution des températures de rameaux et de la température de l'air sous abri météorologique au cours d'une journée de ciel clair et de vent de secteur nord (17/02/1975) (figure 2.14a.) et au cours d'une journée de ciel clair et de vent de secteur sud (21/02/1975) (figure 2.14b.)

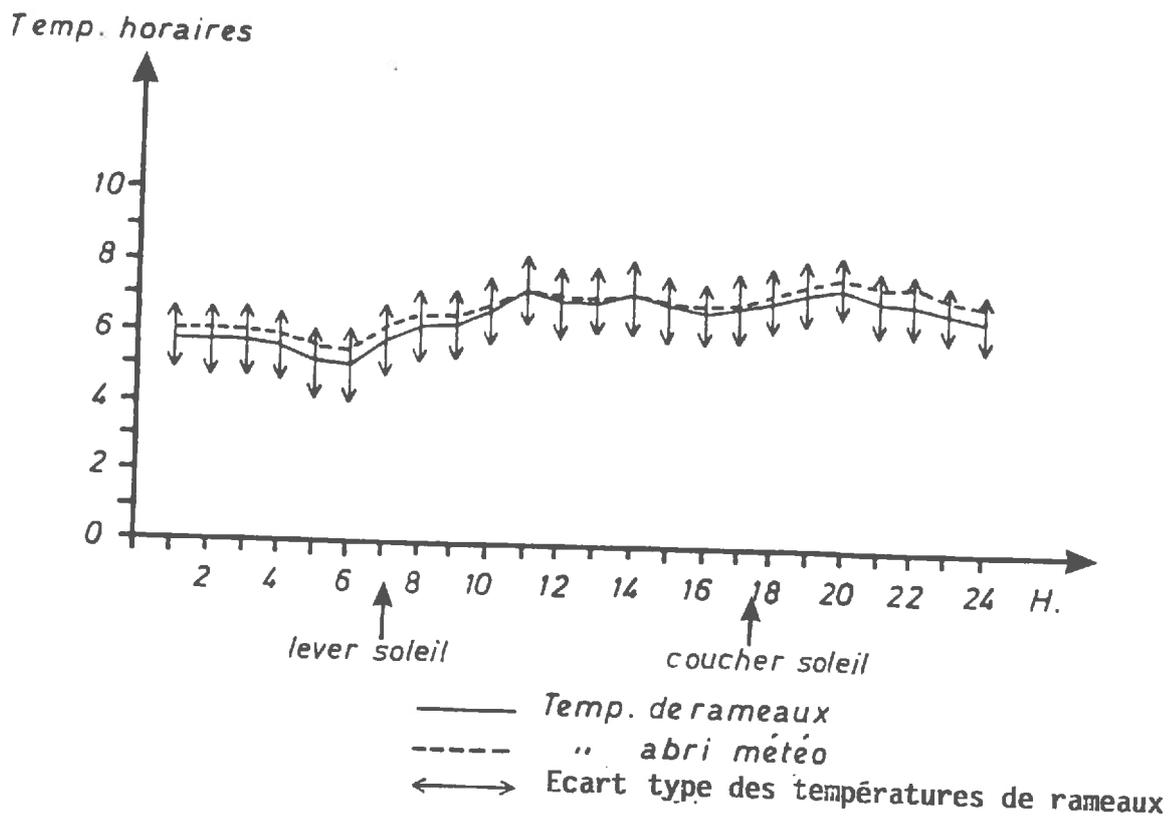


Figure 2.16.
Evolution des températures de rameaux et de la température de l'air sous abri météorologique au cours d'une journée de ciel couvert et de vent modéré de secteur sud (11/02/1975)

Lors de cette journée, on observe de faibles variations de l'écart type de températures de rameaux quelle que soit l'heure de la journée ceci peut être dû la nuit et en début de matinée à une absence de condensation sur le rameau liée à une teneur en eau plus faible de l'atmosphère et à une variabilité moins grande de la vitesse du vent que lors de la situation décrite dans l'exemple précédent. Ici aussi il aurait été souhaitable de disposer des paramètres climatiques mesurés à une échelle de temps inférieure à celle de la journée pour mieux expliquer ces fluctuations de températures.

Ciel couvert et vent modéré de secteur sud

Lors d'une journée correspondant à ces conditions météorologiques ($R_g = 4,3 \text{ MJ.m}^{-2}$, $U = 3,6 \text{ m.s}^{-1}$) (figure 2.16) font apparaître une similitude entre les mesures de température de l'air sous abri et de celles des rameaux. L'amplitude journalière des températures est très faible et l'intervalle de confiance est constant ($\sigma < 1^\circ \text{ C}$) quelle que soit l'heure de la journée. Le rôle prépondérant du rayonnement solaire sur la variabilité des mesures est ici mis en évidence.

Le calcul de l'intervalle de confiance μ à 5 % de la moyenne de la température de rameau calculé à partir de l'écart type de l'échantillon des 10 mesures (tableau 2.2.) met en évidence la différence de signification des mesures selon les conditions météorologiques. S'il est possible de déterminer une température de rameau avec une bonne précision ($\mu < 0,6^\circ \text{ C}$) lors des journées de ciel couvert (11/02/75), il n'en est pas de même lors de journée de ciel clair (17/02 et 21/02 1975) où durant la nuit et en début de matinée, l'intervalle de confiance μ varie entre $0,39^\circ \text{ C}$ et $5,93^\circ \text{ C}$. Ces résultats mettent en évidence la difficulté d'obtenir des mesures de températures de rameaux représentatives de l'ensemble d'un verger.

Heures	μ : Intervalle de confiance (°C)		
	17/02	21/02	11/02
1	2,51	0,52	0,54
2	3,16	0,79	0,57
3	4,13	0,66	0,60
4	0,72	0,79	0,57
5	0,79	0,79	0,60
6	0,66	0,66	0,63
7	5,80	0,52	0,60
8	0,59	0,52	0,57
9	0,39	0,52	0,60
10	0,92	1,32	0,57
11	5,93	2,37	0,63
12	3,16	1,78	0,57
13	2,50	1,97	0,57
14	1,58	1,18	0,63
15	1,18	1,32	0,57
16	1,78	1,71	0,47
17	1,45	1,58	0,57
18	1,45	1,58	0,57
19	0,39	0,66	0,57
20	0,52	0,59	0,57
21	0,66	0,59	0,57
22	0,66	0,66	0,57
23	1,12	0,52	0,57
24	1,45	0,52	0,51

Tableau 2.2.
Variation horaire de l'intervalle de confiance, μ , à 5 % de la moyenne de température de rameau calculée à partir de la variabilité de l'échantillon des mesures de températures de rameaux pour 3 situations météorologiques

2.5. CONCLUSIONS

Les études entreprises au niveau de l'arbre ont mis en évidence la grande variabilité des températures de la surface ou de la zone cambiale des troncs d'arbres fruitiers.

L'analyse des températures de surface a permis de souligner d'une part l'importance du rayonnement solaire direct sur la température de surface du tronc en fonction de l'orientation de l'écorce et d'autre part le rôle de la vitesse du vent sur les écarts entre la température de surface du tronc mesurée à différentes hauteurs et la température de l'air mesurée simultanément à 1.5 m au dessus du sol. Il existe une relation de type linéaire entre l'écart ($T_s - T_a$) et la vitesse du vent, les écarts sont d'autant plus importants que la vitesse du vent est faible.

Les études relatives au blanchiment des troncs d'arbres fruitiers ont permis de souligner l'importance de l'albédo du tronc sur la température d'écorce. Ces travaux ont permis de montrer que l'effet de la peinture blanche sur la température de surface est d'autant plus accentué que le rayonnement solaire est important et que la vitesse du vent est faible. Lorsque le rayonnement solaire est faible (ciel couvert, nuit...), l'émissivité du tronc dans l'infrarouge thermique est la même pour les surfaces peintes et non peintes et le bilan radiatif se traduit par des températures de surface très peu différentes. Le blanchiment des troncs provoque une diminution de la température de surface des troncs lors des journées de ciel clair pendant lesquelles les températures maximales des troncs peints sont nettement inférieures à celles des troncs non peints (l'écart mesuré est fréquemment voisin de 9°C durant la période hivernale).

Le blanchiment des troncs n'a aucun effet de protection contre le gel lorsque celui-ci se produit la nuit et de plus, il provoque un abaissement de la température du tronc en période de gel diurne. En diminuant l'amplitude thermique journalière, la peinture blanche atténue les variations de diamètre du tronc dues aux écarts thermiques.

Les résultats expérimentaux relatifs aux mesures de températures faites dans la zone médulaire et sous l'écorce de jeunes rameaux d'arbres fruitiers ont mis en évidence la différence entre la réponse thermique d'un rameau et celle de capteurs généralement utilisés en agrométéorologie. Nous avons ainsi pu observé des vitesses de réchauffement et de refroidissement plus rapide sous l'écorce que dans l'air et des amplitudes thermiques journalières plus importantes sous l'écorce que sous abri météorologique.

Les études relatives à la variabilité des températures d'écorce en fonction de la situation météorologique ont montré que la signification des mesures de températures de rameaux était très dépendante des conditions météorologiques. Les mesures des températures de rameaux sont peu variables lors de journées de ciel couvert. Lors des journées de ciel clair, les fluctuations sont plus importantes en particulier lorsqu'il y a formation de condensation sur les rameaux. Nous avons également mis en évidence la difficulté de disposer de mesures représentatives de ce qui se passe au niveau de l'ensemble d'un verger.

Ces expérimentations ont également souligné la nécessité de disposer de mesures microclimatiques simultanées à un pas de temps horaire lorsque l'on veut expliquer de façon précise les phénomènes qui entrent en jeu. Ainsi dans ces travaux, la connaissance des variations horaires du rayonnement global et de la vitesse du vent ainsi que la mesure de cette dernière à différentes hauteurs au dessus du sol auraient permis une analyse plus précise des variations des températures de surfaces d'arbres fruitiers.

III. LE MICROCLIMAT DE COUVERTS FORESTIERS

Après avoir analysé les échanges d'énergie à l'échelle d'un arbre, il nous a semblé logique d'analyser les variations microclimatiques au sein d'un groupe d'arbres formant un massif forestier.

Nous utiliserons pour cela les résultats obtenus à propos de travaux relatifs à deux peuplements de cèdres de l'Atlas (*Cedrus atlantica*). Des travaux analogues sur d'autres essences existaient déjà (RAYNOR, 1971 ; ROUSSEL, 1972 ; BALDY, 1973 ; GALOUX, 1973 ; CACHAN, 1974 ; AUSSENAC, 1975 ; AUSSENAC et DUCREY, 1977) mais rien n'avait encore été fait dans ce domaine sur les cèdres qui ont été introduits en France en 1860 à partir de l'Afrique du Nord (MAURY, 1960 ; TOTH, 1970-1972).

L'analyse du microclimat de la cédraie a été entreprise de façon à mieux comprendre le fonctionnement de ce nouvel écosystème forestier et aider à expliquer ses potentialités de régénération, sa résistance au feu et à la sécheresse ou sa sensibilité à certaines attaques de ravageurs (FABRE, 1976 ; VERBRUGGHE, 1988). Par ailleurs, cela doit également permettre de guider le sylviculteur lors de ses interventions dans l'exploitation des peuplements forestiers (AUSSENAC, 1984) C'est travaux s'inscrivent aussi comme une contribution à l'explication générale des microclimats.

3.1. LES ECHANGES ENERGETIQUES A L'INTERIEUR D'UN COUVERT FORESTIER

Lorsqu'on se place au-dessus d'un couvert forestier, le bilan d'énergie est indépendant du niveau choisi à condition de se situer dans la couche limite à flux conservatif (Paragraphe 1.1). A l'intérieur d'un couvert végétal, il est possible de

définir un bilan d'énergie pour une strate de végétation située au niveau moyen z (PERRIER, 1973).

L'équation du bilan d'énergie peut alors s'écrire :

$$R_n(z) + \Phi_H(z) + \Phi_L(z) + MC (dT/dt) = 0$$

avec :

$R_n(z)$: Bilan des flux radiatifs au niveau z ,

$\Phi_H(z)$: Flux de chaleur sensible dans l'air au niveau z ,

$\Phi_L(z)$: Flux de chaleur latente dans l'air au niveau z ,

$MC (dT/dt)$: Variation de la quantité de chaleur stockée au niveau z . M : Masse des organes végétaux pour la strate considérée, C : Capacité calorifique des organes végétaux, dT : variation de température durant l'intervalle de temps dt .

On néglige, dans ce cas l'énergie utilisée par la photosynthèse ($\Delta\Phi CO_2$) et celle de la respiration, leurs valeurs étant très faibles (environ 1%) par rapport aux autres termes du bilan. On suppose également que les termes d'advection sont négligeables.

Par ailleurs le terme $MC (dT/dt)$ peut être négligé dans certains cas particuliers :

- Les mesures sont effectuées sur une période de 24 heures avec des conditions météorologiques stables. Le terme $MC(dT/dt)$, intégré sur un cycle thermique, est alors nul.

- Les mesures sont effectuées aux alentours du maximum ou du minimum de température. Le terme dT/dt est alors très faible.

Dans nos études, ce sont les mesures au moment du maximum et du minimum de température qui nous intéressent plus particulièrement pour caractériser le microclimat à l'intérieur de la forêt. D'une façon pratique, nous disposons de 1 à 2 heures autour du maximum et du minimum de température au cours de laquelle nous pouvons appliquer l'équation simplifiée du bilan d'énergie :

$$R_n(z) + \Phi_H(z) + \Phi_L(z) = 0$$

3.2. LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.2.1. Sites expérimentaux et méthodologie

Deux sites expérimentaux ont été retenus compte tenu de l'intérêt qu'ils présentaient pour les études entreprises sur un parasite du cèdre : Epinotia cedricida Diakanoff.

Le premier est situé dans le Massif du Petit Luberon à 700 m d'altitude sur la forêt communale du Ménerbes (longitude 3,23 E grades, latitude 49,05 N grades). Les cèdres sont situés sur la crête du massif, ils sont âgés d'environ 40 ans, ils constituent un peuplement de régénération sur incendie relativement dense (1 768 tiges/ha). Leur circonférence moyenne est d'environ 40 cm, leur hauteur moyenne 7,5 m, la surface terrière (*) est d'environ 24 m²/ha.

(*) La surface terrière est la somme des surfaces des troncs mesurées à une hauteur de 1,30 m sur une superficie d'un hectare.

Le second site expérimental fait partie de la forêt domaniale des Solanes de Nore dans le Minervois sur un versant Sud (longitude 0,16 E grades, latitude 48,17 N grades). Il s'agit ici d'un peuplement adulte situé à 560 m d'altitude. Les cèdres sont âgés de 53 ans, ils se différencient des précédents par leur morphologie. Leur circonférence moyenne est de 110 cm, leur hauteur moyenne est de 13 m, la surface terrière est ici d'environ 50 m²/ha.

Sur les deux sites, les mesures microclimatiques étaient réparties depuis le sol jusqu'au sommet du couvert forestier. Un mât de 8 m, comportant 4 à 6 niveaux de mesures a été implanté dans la cédraie du Luberon (150 ha). Dans la cédraie du Minervois (500 ha), deux mâts de 12 m ont été installés l'un à l'intérieur du peuplement, l'autre à découvert à 150 m de la lisière et à environ 200 m du premier (figure 3.1.). Les mesures étaient effectuées simultanément à 6 ou 7 niveaux sur les 2 mâts. Ce dispositif de mesures comparatives était destiné à déterminer les effets du couvert forestier sur le microclimat (figure 3.2.).

Les températures de l'air, du sol et des branches ont été analysées. Les températures de l'air étaient mesurées à l'aide de sondes à résistance de platine placées à l'intérieur de tuyères ventilés, les températures de branches étaient mesurées par des thermocouples implantés dans l'écorce à la partie supérieure de branches horizontales. Les températures du sol étaient mesurées avec des sondes à résistances de platine placées à 10 cm de profondeur sous la cédraie et en zone ouverte. Des pyranomètres linéaires répartis depuis la base du houppier jusqu'au sommet du couvert ont permis de suivre l'évolution du profil vertical du

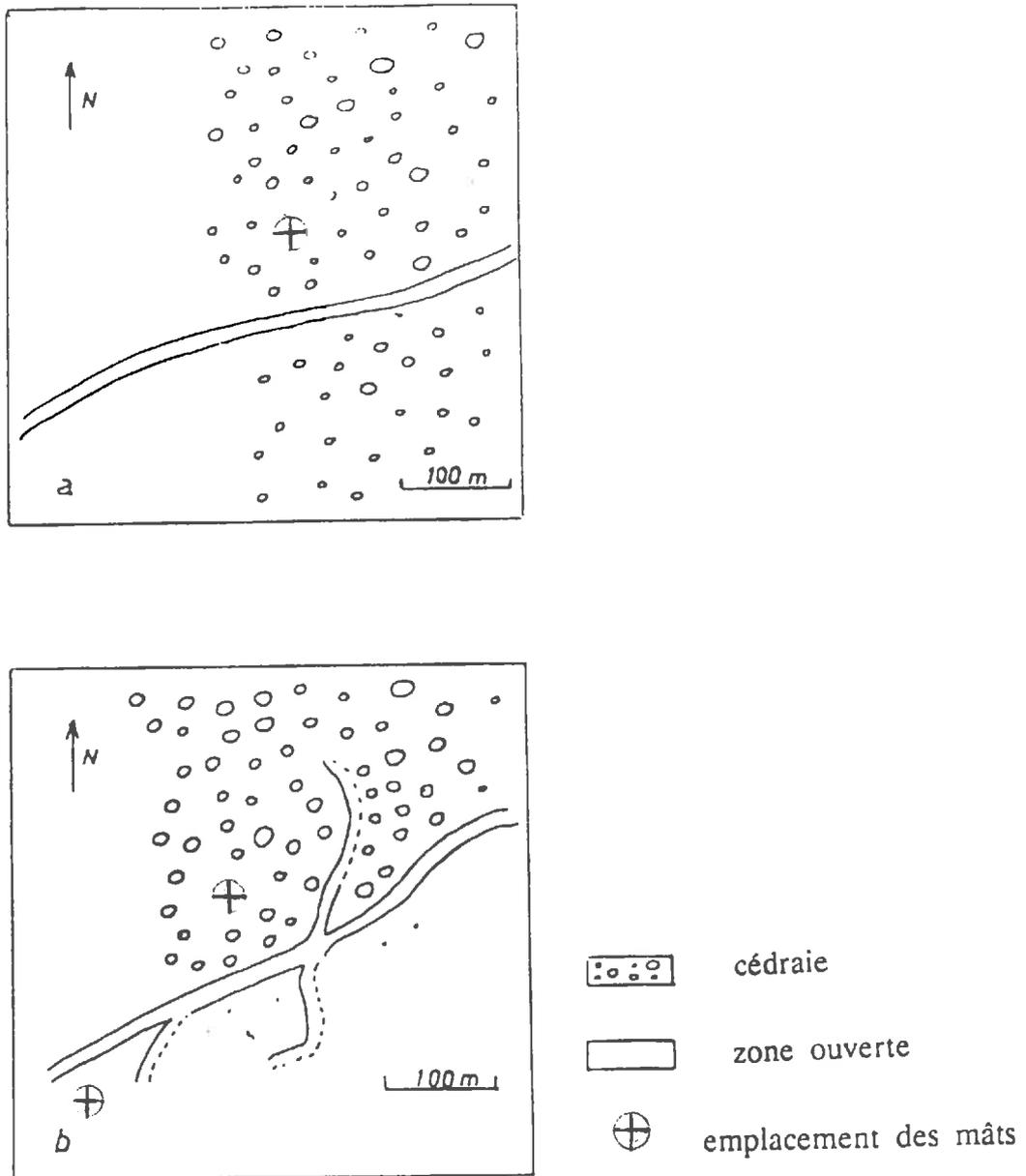


Figure 3.1.
Schéma de localisation des sites expérimentaux
a. au Luberon
b. au Minervois

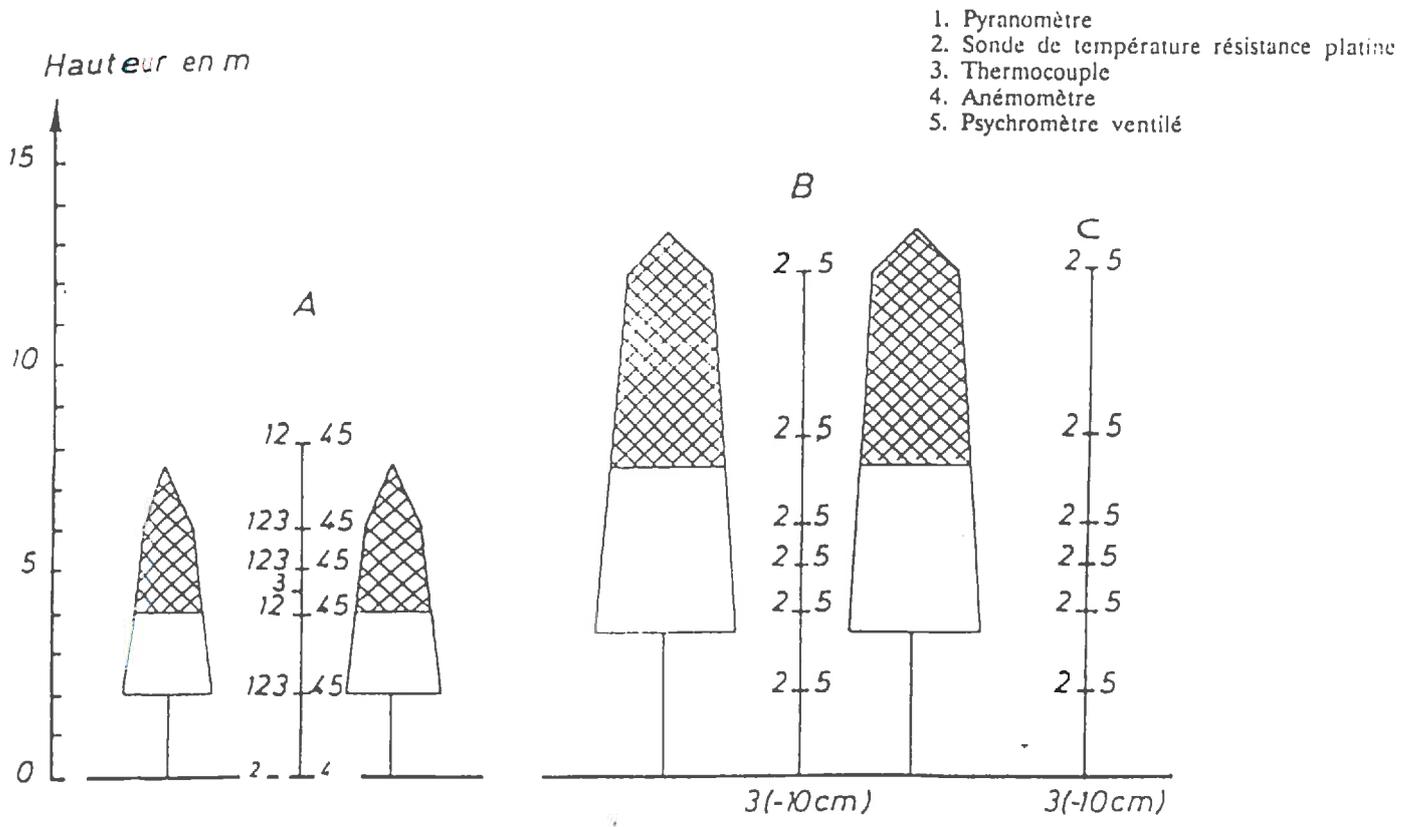


Figure 3.2.
Schéma des dispositifs expérimentaux
A. Dans un peuplement du Luberon
B. Dans un peuplement du Minervois
C. Dans la zone ouverte du Minervois.

Houppier vivant 
Houppier non vivant 

rayonnement global à l'intérieur du couvert. Les gradients d'humidité ont été calculés à partir de mesures faites à l'aide de psychromètres ventilés placés depuis le sol jusqu'au sommet de la cédraie. De la même façon, les profils verticaux de vitesse du vent ont été mesurés à l'aide d'anémomètres Aandera placés à l'extrémité de bras horizontaux, la direction du vent était déterminée par une girouette située en zone dégagée.

Tous les capteurs étaient interrogés, au même instant, et les mesures étaient stockées sur des centrales d'acquisition de données Aandera. Les données étaient enregistrées toutes les 10 minutes, les températures correspondaient à des mesures instantanées alors que les mesures de rayonnement et de vitesse de vent étaient, elles, intégrées sur un intervalle de 10 minutes.

Les résultats présentés sont relatifs à des journées de ciel clair et à des journées de ciel couvert. Ces deux situations représentaient environ 70 % des situations météorologique dans la basse vallée du Rhône (paragraphe 2.3.2). Ces conditions météorologiques correspondent de plus, à des journées où les fluctuations instantanées sont faibles, ce qui facilite l'interprétation des résultats expérimentaux.

3.2.2. Les profils de rayonnement dans le couvert forestier

Il existe dans la littérature de nombreux modèles traitant des aspects de la pénétration du rayonnement dans la végétation (MONTEITH, 1965 ; CHARTIER, 1967, 1970 ; COWAN, 1968 ; BONHOMME, VARLET-GRANCHER, 1977 ; ALEXANDRE, 1982). Ils sont généralement basés sur la loi de Beer-Lambert tel que :

$$I = I_0 e^{-kF}$$

avec

I : Rayonnement à un niveau donné dans la végétation,

I_o : Rayonnement incident,

k : Coefficient dépendant de la distribution angulaire des feuilles,

F : Indice foliaire jusqu'au niveau de la mesure.

Les modèles cherchant à quantifier avec précision les phénomènes radiatifs dans la végétation sont généralement très complexes et nécessitent la prise en compte de très nombreux paramètres.

Nous nous bornerons ici à présenter et discuter les résultats expérimentaux relatifs à des profils verticaux de rayonnement global mesurés dans la cédraie lors de situations météorologiques très différenciées.

La figure 3.3. montre l'évolution de la répartition verticale du rayonnement global dans la forêt du Luberon lors d'une journée de ciel clair l'été, le 10 août 1976 où le rayonnement global maximal atteignait 800 W.m^{-2} .

Lors de cette journée, le profil vertical de rayonnement (figure 3.4A.) est caractérisé par deux zones bien distinctes : une zone de forts gradients correspondant aux strates supérieures de la végétation (4–8 m) où se situe le maximum de la biomasse végétale (estimation visuelle) et une zone de gradients faibles au niveau des strates inférieures (0–4 m). On remarque cependant dans l'exemple présenté que le niveau de cassure entre les deux zones de profil évolue au cours de la journée. Le point d'inflexion passe du niveau 4 m au niveau 6 m entre 8 heures et 16 heures. Cette variation de gradients d'éclairement relatif dans les strates supérieures de la végétation s'explique par une dissymétrie de la structure de la cédraie à l'endroit de la mesure qui était plus ouverte du côté Est que du côté Ouest.

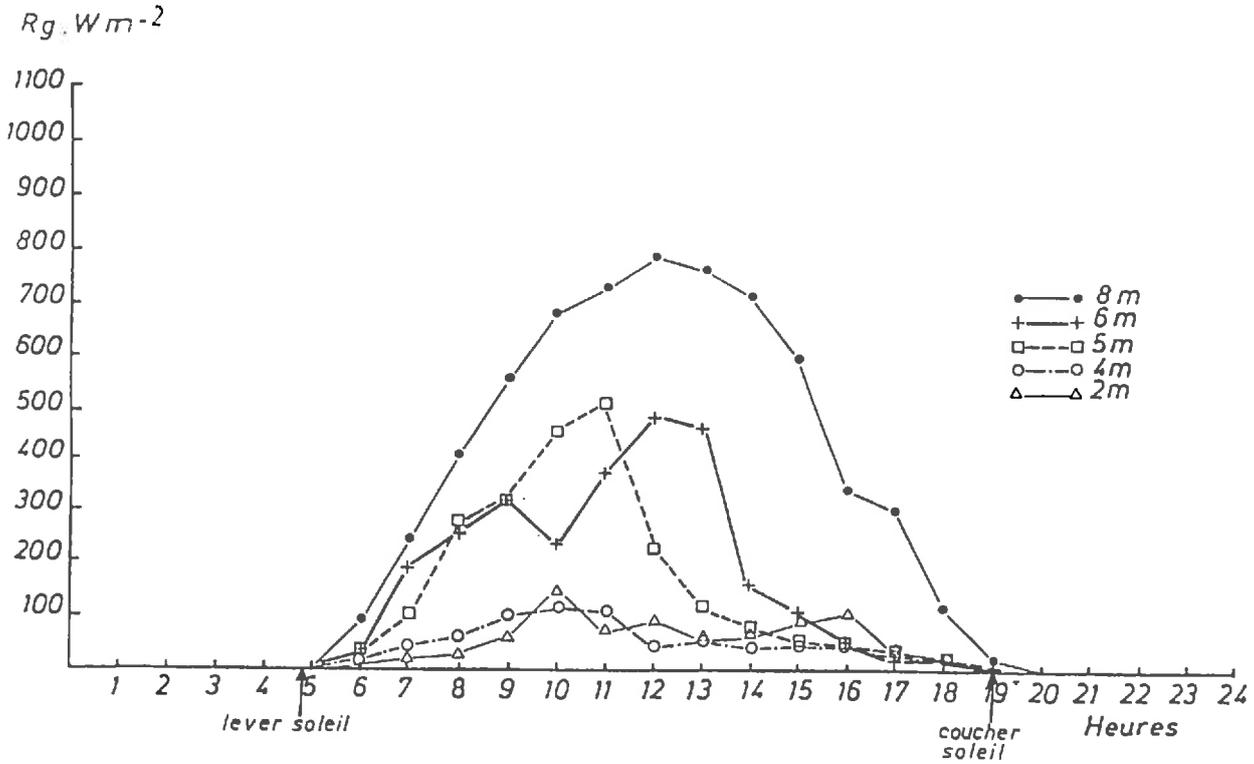


Figure 3.3.
Evolution journalière du rayonnement global mesuré à différents niveau dans la cédraie du Luberon lors d'une journée de ciel clair (R_g max = $800 W.m^{-2}$) le 10-08-1976

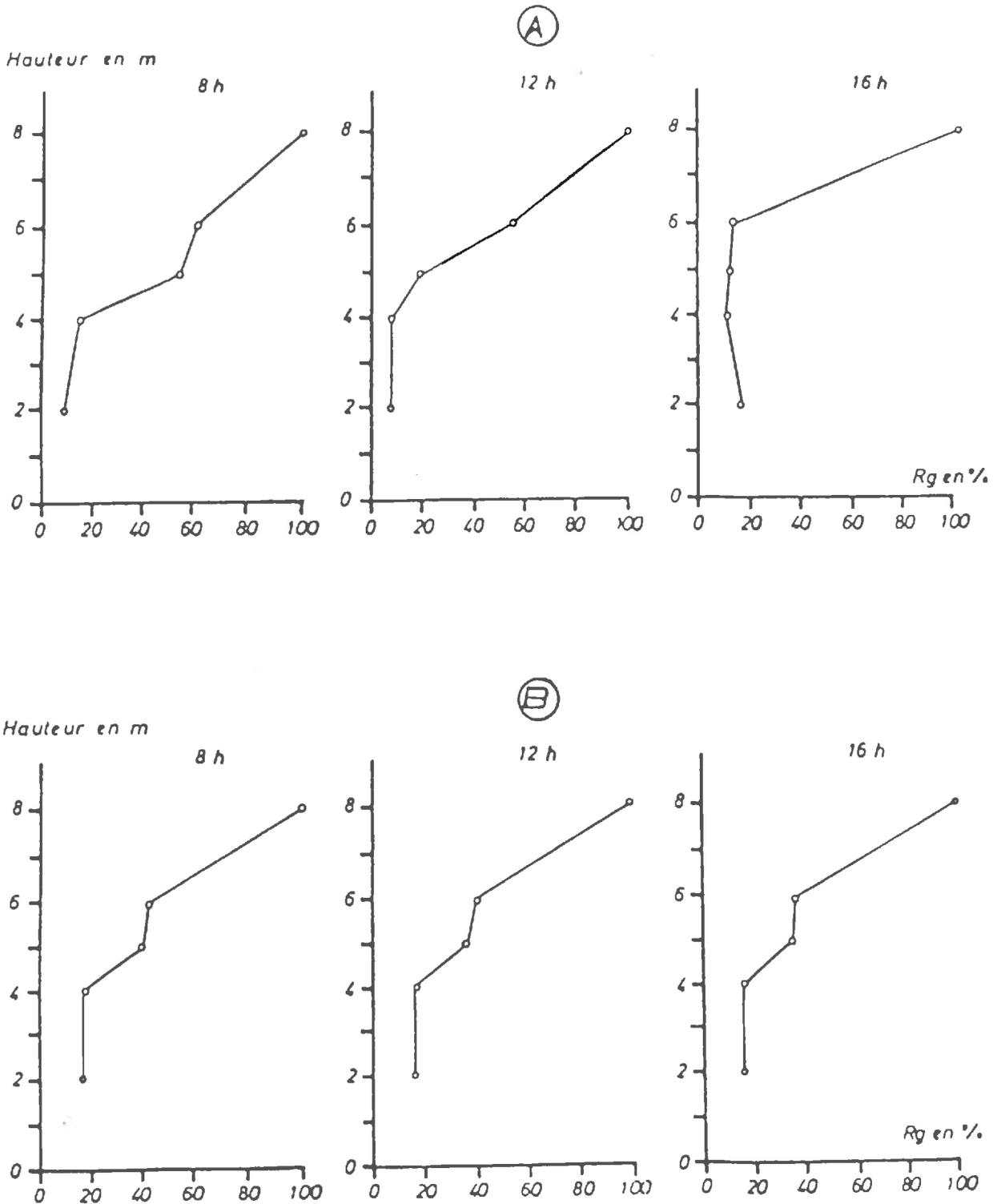


Figure 3.4.

Evolution des profils du rayonnement global dans la forêt du Luberon

A. Lors d'une journée de ciel clair le 10.08.76 ($R_g \text{ max} = 800 \text{ W.m}^{-2}$)

B. Lors d'une journée de ciel couvert le 28.08.76 ($R_g \text{ max} = 400 \text{ W.m}^{-2}$)

La strate inférieure (2–4 m) ne reçoit qu'une très faible partie du rayonnement incident (environ 10 %). Ce dernier étant très fortement intercepté par les surfaces végétales des strates supérieures. L'intensité relative du rayonnement est ici indépendante de la hauteur apparente du soleil. Il est à noter qu'au-dessous du niveau 4 m, le rayonnement est insuffisant pour maintenir en place le feuillage des cèdres, ce niveau de rayonnement ne permettant pas non plus les régénérations. Ces résultats sont spécifiques à la cédraie, en effet, des observations ont montré que des éclaircissements relatifs de 4,3 % permettent encore le développement de feuilles de hêtres (AUSSENAC et DUCREY, 1977) dans l'Est de la France.

Lors d'une journée de ciel couvert le 28 août 1976 où le rayonnement global maximal n'était que de 400 W.m^{-2} , les profils verticaux (figure 3.4B.) sont également caractérisés par deux zones distinctes : une zone de forts gradients au niveau des strates supérieures (4–8 m) et une zone d'éclaircissement relatif faible et constant (environ 18 %) entre les niveaux 2 et 4 m. Les profils (exprimés en valeurs relatives) sont identiques quelle que soit l'heure de la journée. Le rayonnement diffus étant multidirectionnel, la strate inférieure est caractérisée par un coefficient d'extinction plus faible que celui du rayonnement direct. La même observation avait déjà été faite dans un peuplement de feuillus (AUSSENAC et DUCREY, 1977).

Les profils verticaux de rayonnement global à l'intérieur de la cédraie sont donc caractérisés par une forte atténuation de l'énergie solaire dans les strates supérieures de la végétation et par un éclaircissement relatif faible et constant dans les couches inférieures. Les variations du rayonnement sont liées à la répartition spatiale des feuilles, sous le houppier, l'intensité du rayonnement solaire direct et diffus reste constante mais avec des niveaux différents selon le type de rayonnement. Dans la zone d'interception du rayonnement par le feuillage des cèdres, on observe une variation sensiblement exponentielle du rayonnement global (profils à 8 et 12 heures).

3.2.3. Les profils de vitesse du vent à l'intérieur d'un couvert forestier

De nombreux auteurs s'accordent pour trouver des profils de vitesse de vent de forme exponentielle à l'intérieur d'un couvert forestier (BAYNTON, 1964 ; ALLEN, 1968 ; MERONEY, 1970). Entre la base du houppier et le sommet de la forêt, les profils peuvent être définis par la relation :

$$U(z) = U(h) e^{[-\alpha (1-z/h)]} \quad (3.1.)$$

avec :

$U(z)$: Vitesse du vent au niveau z ,

$U(h)$: Vitesse du vent au sommet de la végétation,

α : Un coefficient compris entre 2 et 4 pour un couvert modérément dense,

h : Hauteur de la végétation.

En dessous de la base du houppier, les profils de vitesse sont quasi-uniformes (MERONEY, 1970).

L'évolution des profils verticaux de vitesse de vent dans la cédraie du Luberon a été représentée pour deux situations météorologiques, l'une correspond à des journées de vent faible ($U < 1 \text{ m.s}^{-1}$), l'autre à des journées de mistral

($U > 5 \text{ ms}^{-1}$).

Lors des journées de mistral (figure 3.5a.), on distingue deux zones dans le profil vertical :

- Une zone de forts échanges turbulents dans la strate supérieure du peuplement (6–8 m). Malgré une densité végétale faible, l'atténuation verticale de la vitesse du vent est ici très importante (la vitesse passe de 7 ms^{-1} au-dessus de la forêt à 2 ms^{-1} au niveau 6 m à 4 heures et de 5 à 1 m.s^{-1} à 14 heures).

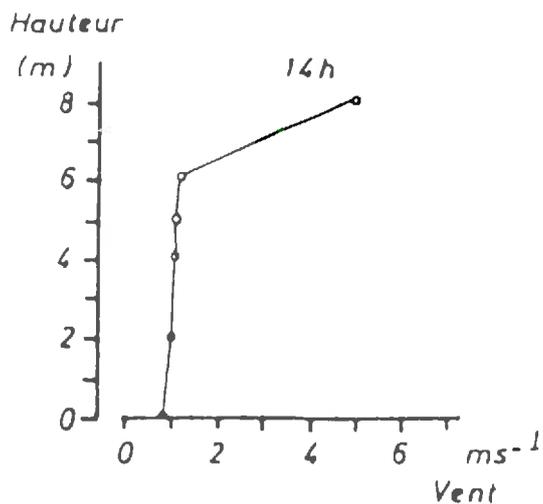
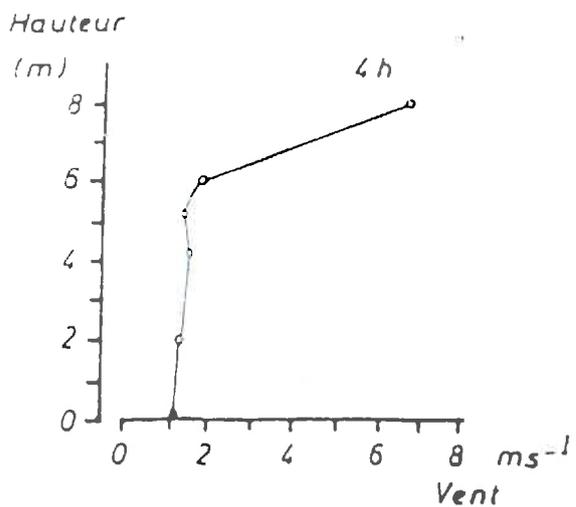
- Une zone de faibles échanges turbulents (0–6 m) dans laquelle la vitesse du vent est pratiquement constante.

Lors de journées de vent faible, les profils de vitesse de vent sont plus dépendants de la répartition verticale de la biomasse (figure 3.5b.).

Par vent fort, le profil vertical de vitesse sous forêt ne suit pas exactement la répartition théorique exponentielle. Les vitesses mesurées restent cependant proches de celles du profil théorique donné par l'équation (3.1.) (figure 3.6.).

Par vent faible, le profil expérimental est proche du profil théorique (figure 3.6.) dans tout le houppier. Il existe en-dessous du houppier, une zone de survitesse (niveau 2 m) qui peut s'expliquer par un écoulement préférentiel de l'air entre les troncs (perméabilité importante).

(A)



(B)

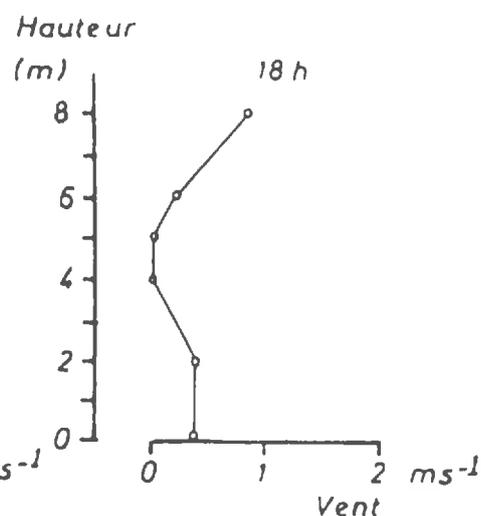
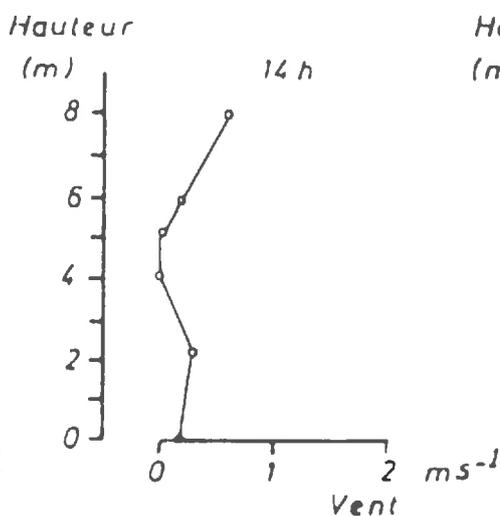
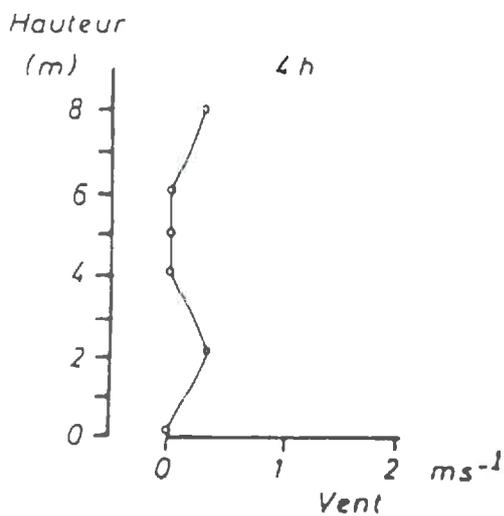


Figure 3.5.
Profils verticaux de vitesses de vent dans la forêt du Luberon
A. Lors d'une journée de mistral (le 26.07.77)
B. Lors d'une journée de vent faible (le 28.07.77)

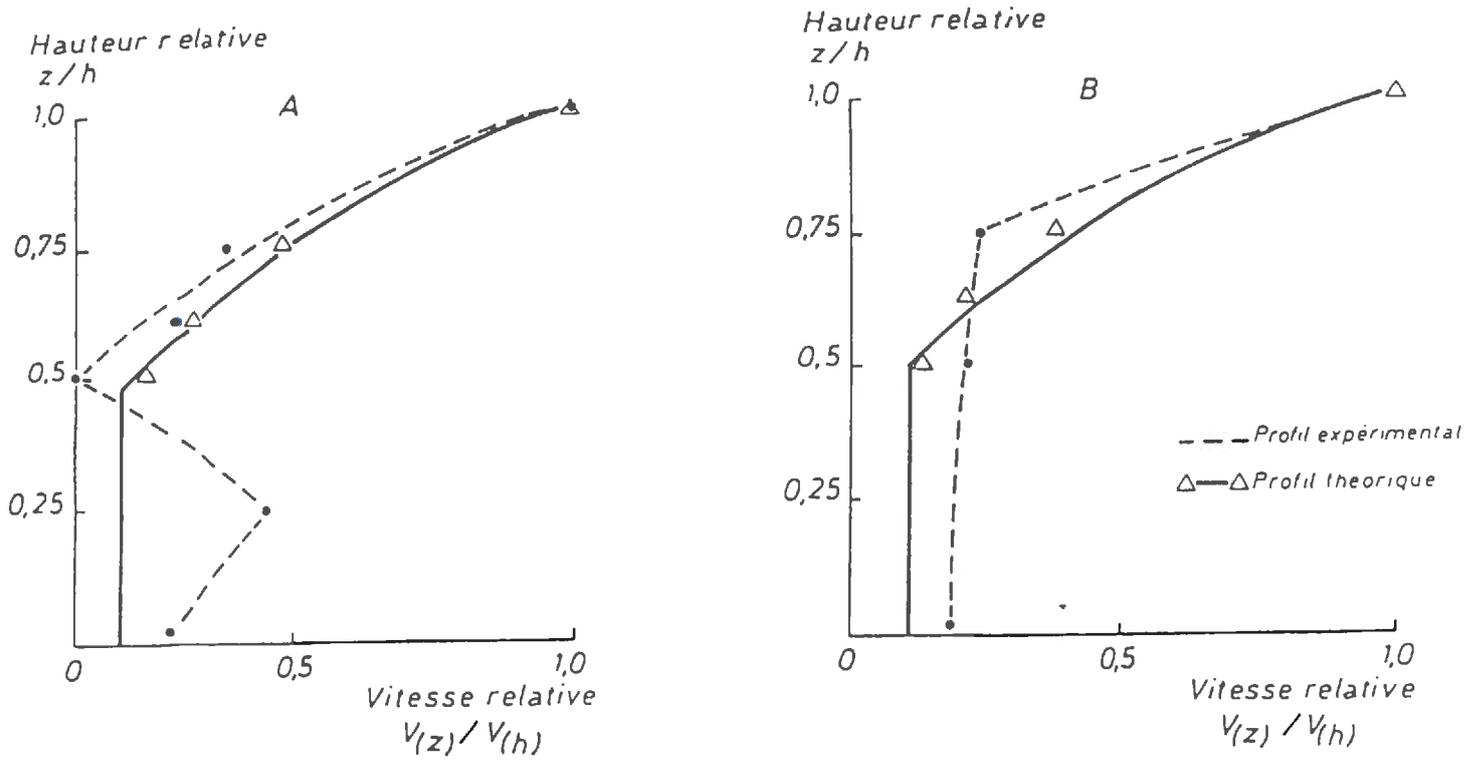


Figure 3.6.
Profils verticaux de vitesse du vent dans la cédraie du Luberon
A. Lors d'une journée de vent faible
B. Lors d'une journée de mistral

La cédraie modifie de façon importante le profil vertical de la vitesse de vent que l'on sait logarithmique en terrain plat et dégagé (DEACON, 1949 ; SHEPPARD, 1958 ; WEBB, 1962 ; DYER, 1963 ; KLUG, 1967). Le couvert forestier a pour rôle essentiel de réduire les échanges turbulents, l'effet de la biomasse dépend cependant de la situation météorologique. Lors de situations de vent fort, la réduction de la vitesse du vent se produit essentiellement dans la strate supérieure (6–8 m) de la forêt, le profil étant ensuite quasi vertical jusqu'au sol (zone 0–6 m). Les résultats sont analogues à ceux obtenus dans des peuplements de mélèzes du Japon (ALLEN, 1968) ou de pins (RAYNOR, 1971). Lors de situations de vent faible, les variations verticales de vitesse sont plus directement liées aux variations de densité végétale. Il faut toutefois souligner que dans ce cas, les mesures se situent au niveau du seuil de démarrage des anémomètres.

3.2.4. Les profils verticaux de températures

a. Comparaison entre les températures de l'air et les températures de surface de branches

L'évolution des profils verticaux des températures de l'air et d'écorce a été analysée dans la forêt du Luberon par une journée de beau temps ($R_g \text{ max} = 800 \text{ W.m}^{-2}$) le 21 juillet 1977. L'évolution des profils de températures de l'air est analogue à celle qui existe généralement en zone ouverte (figure 3.7.). Le jour, la température est plus élevée au niveau du sol qu'au sommet de la végétation ($\Delta T = 1^\circ\text{C}$). Les gradients s'annulent vers 20 heures puis s'inversent au cours de la nuit ($\Delta T = 3^\circ\text{C}$). En période diurne

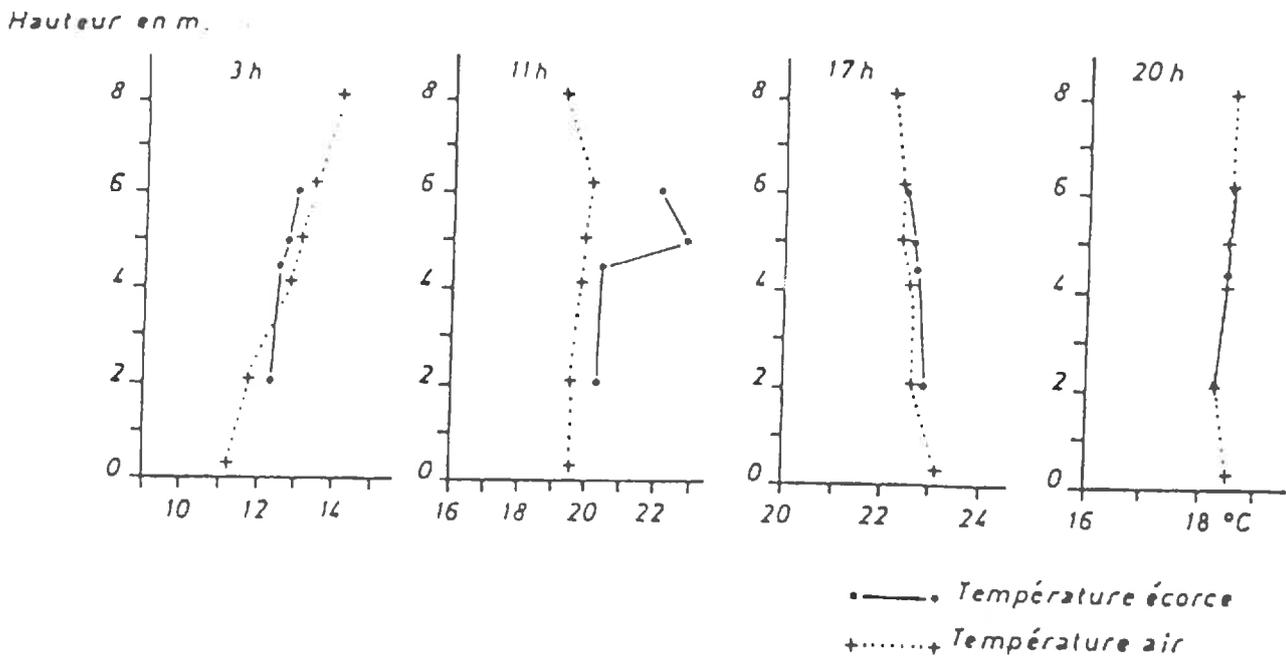


Figure 3.7.

Evolution des profils verticaux des températures de l'air et d'écorce dans la cédraie du Lubéron lors d'une journée de beau temps le 21 juillet 1977

l'apport énergétique provient du rayonnement net, les pertes d'énergie sont dues au flux de chaleur sensible et de chaleur latente dans l'atmosphère et de chaleur sensible dans le sol. La nuit, les flux sont inversés, le terme rayonnement net correspond à une perte d'énergie, les autres flux devenant positifs. Sur ce site, le sol joue le rôle de surface d'échange. Il s'agit d'un jeune peuplement, la faible hauteur des arbres, la surface foliaire peu développée et la persistance de quelques trouées ne modifient pas totalement la répartition des flux observée généralement en milieu découvert (paragraphe 1.2.3.).

On note, cependant, qu'il n'existe pas à proximité du sol d'accentuation des gradients de températures contrairement à ce qu'on trouve généralement en zone ouverte. Le couvert forestier atténue les échanges d'énergie au niveau du sol.

Les températures d'écorce de branches ont été mesurées simultanément aux températures de l'air.

Les températures d'écorce dépendent des échanges énergétiques qui ont été décrits au paragraphe 2.1. Les résultats expérimentaux (figure 3.7.) mettent en évidence de faibles écarts entre les températures de l'air et les températures d'écorce sous couvert. Seules les branches exposées au rayonnement direct présentent des températures de surface nettement supérieures à celles de l'air ($\Delta T = 3 \text{ à } 4^\circ \text{ C}$).

En l'absence de rayonnement direct, les températures d'écorce sont légèrement plus élevées le jour ($\Delta T \approx 0,8^\circ \text{ C}$), et légèrement plus basses la nuit ($\Delta T = 0,5^\circ \text{ C}$) que la température de l'air. Ces résultats illustrent l'importance des termes radiatifs sur la température de surface des branches et sont en bon accord avec les analyses théoriques qui ont été effectuées dans le paragraphe 2.1..

Ces résultats expérimentaux soulignent l'importance du rôle du feuillage sur la température d'écorce. Nous avons vu (chapitre 2) que, dans un verger, l'hiver, les températures d'écorce étaient très différentes de celle de l'air. Dans la cédraie, au contraire, les températures d'écorce ne sont pas significativement différentes de celles de l'air, l'interception du rayonnement solaire par le feuillage d'une part et une vitesse du vent constante dans une grande partie du couvert d'autre part provoquent l'homogénéisation des températures dans le couvert forestier.

b. Comparaison des profils de température de l'air sous couvert forestier et en zone ouverte dans le Minervois

L'analyse des profils verticaux de températures de l'air dans la forêt du Minervois au cours d'une journée de beau temps (figure 3.8.) met en évidence l'absence de gradients thermiques.

Quelle que soit l'heure de la journée, les écarts maximaux observés entre les niveaux 2 et 12 m sont inférieurs à $0,5^{\circ}$ C. Au contraire, en zone ouverte, les écarts atteignent $2,5^{\circ}$ C.

Le jour, les profils sous forêt, font apparaître des températures de l'air plus basses qu'en zone ouverte à la base du couvert (0 à 5 m) et plus élevées au niveau des strates supérieures. Le point d'intersection des profils passe progressivement de 5 à 10 m entre 10 heures et 16 heures. Le rayonnement direct absorbé par la végétation ainsi que sa transpiration ont pour effet d'homogénéiser le profil de températures de l'air sous couvert.

Au contraire, en zone ouverte, le profil thermique est très dépendant des échanges d'énergie entre le sol et l'air, le sol jouant le rôle de surface d'échange. Il existe des écarts importants ($\Delta T \approx 10^{\circ}$ C) entre les températures maximales mesurées à - 10 cm dans le sol en zone ouverte et celles mesurées à - 10 cm sous forêt.

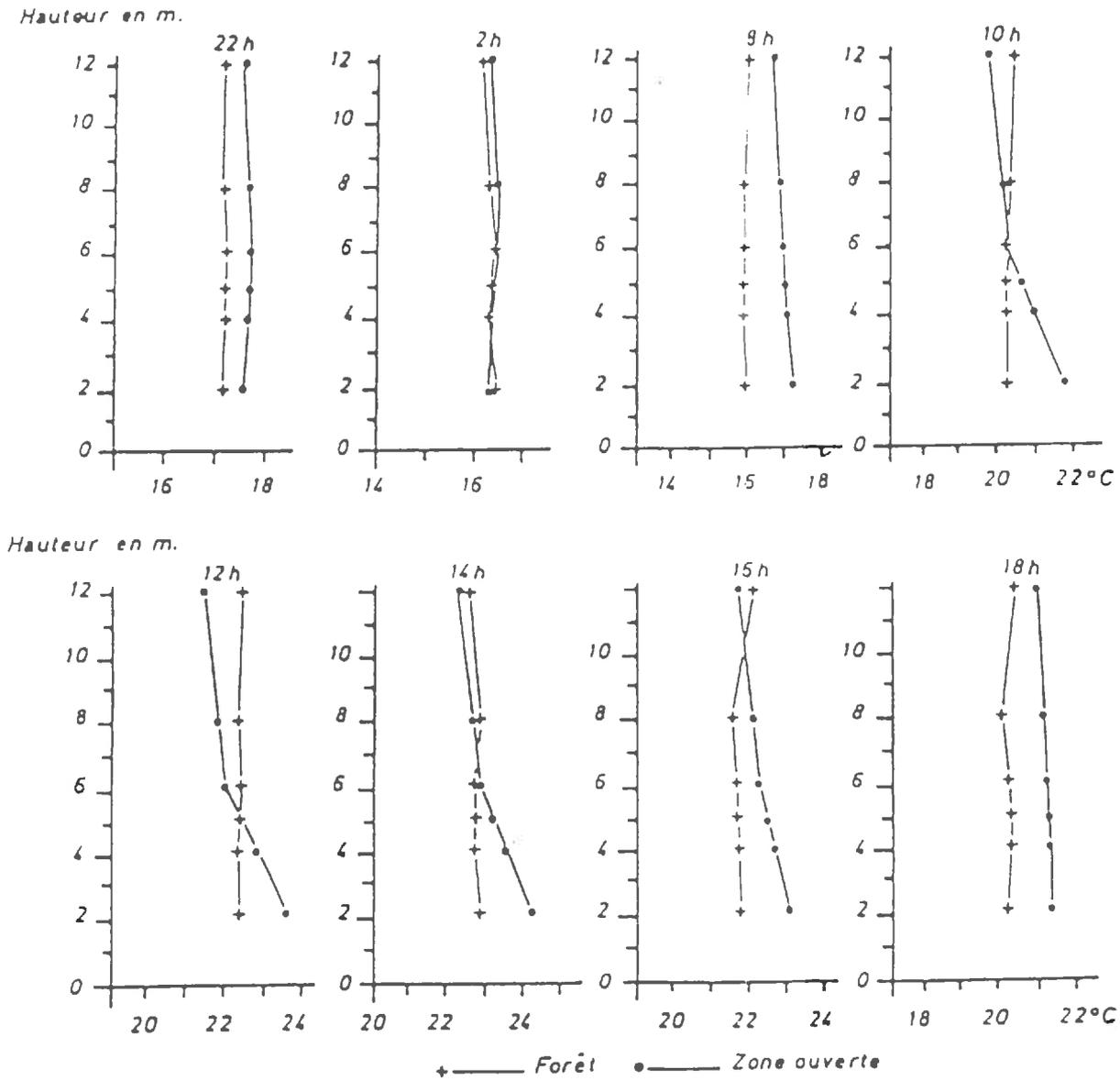


Figure 3.8.
Evolution des profils verticaux des températures de l'air dans la cédraie du Minervois et en zone ouverte lors d'une journée de beau temps le 1er septembre 1979.

Sous le couvert, la biomasse végétale de la cédraie et la couche d'humus recouvrant le sol absorbent le rayonnement direct, réduisent l'énergie arrivant au sol et par suite, diminuent l'amplitude journalière des températures du sol (figure 3.9.). Cet écart important entre la température du sol sous le couvert forestier et en zone ouverte explique la différenciation des profils verticaux des températures de l'air à proximité du sol durant la journée.

Au niveau des strates supérieures, l'apport énergétique du rayonnement solaire provoque une élévation des températures de surfaces végétales qui par conduction – convection échauffent l'air environnant.

La nuit, les gradients de températures de l'air sont faibles aussi bien sous couvert forestier qu'en zone ouverte. Les températures sous forêt sont plus basses d'environ 1,5° C depuis le sol jusqu'au sommet du couvert, cette configuration des profils verticaux débute à 18 heures, ensuite, le refroidissement plus rapide de la zone ouverte se traduit par une réduction progressive des écarts de températures qui s'annulent vers 2 heures. La biomasse modifie, la nuit, les échanges thermiques essentiellement en constituant un obstacle aux pertes d'énergie dues au flux de chaleur provenant du sol.

Les modifications des échanges énergétiques dans la forêt de cèdres du Minervois ont donc un effet significatif sur la température de l'air. Le couvert forestier modifie tout au long de la journée, l'évolution du profil vertical de la température de l'air. La forêt réduit les gradients verticaux, elle est, le jour, caractérisée par des températures de l'air plus basses à la base du couvert et plus élevées au niveau des strates supérieures ; la nuit, les températures sont plus basses ou égales à celles de la zone ouverte sur l'ensemble du couvert forestier.

Les températures de l'air à l'intérieur d'une cédraie dépendent cependant de la structure de la végétation. En effet, la cédraie du Luberon est caractérisée par une surface terrière faible (24 m²/ha) les cèdres ne sont pas très hauts et la biomasse foliaire n'a pas atteint son plein développement dans ces conditions, il existe des gradients de température entre le sommet de la forêt et le sol et le

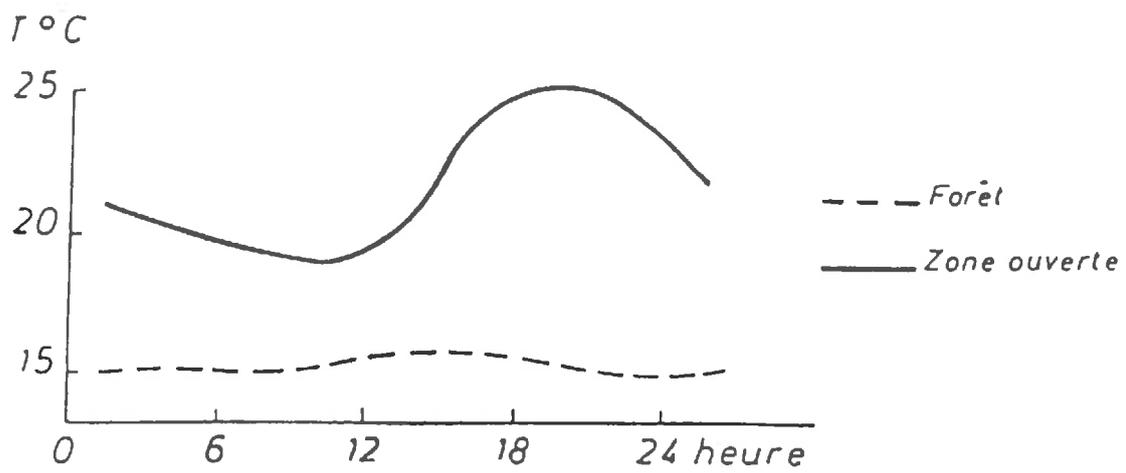


Figure 3.9.
Evolution journalière de la température du sol mesurée à - 10 cm sous la cédraie et en zone ouverte (le 1.09.79)

sens des flux d'énergie est analogue à celui généralement rencontré en zone dégagée.

Par contre dans la cédraie du Minervois où le peuplement est caractérisé par une surface terrière plus importante (50 m²/ha) les arbres sont plus hauts et la biomasse foliaire plus développée, les gradients sont alors très atténués.

Ainsi, dans la cédraie, la répartition verticale de la température de l'air dépend de la répartition de la biomasse qui modifie plus ou moins, l'intensité des flux d'énergie provenant du rayonnement solaire le jour et les pertes d'énergie provenant du sol la nuit.

3.2.5. Les profils d'humidité de l'air à l'intérieur d'un couvert forestier

L'analyse des profils d'humidité lors d'une journée de beau temps l'été dans la cédraie du Luberon, fait apparaître de faibles variations verticales de la teneur en eau de l'air sur l'ensemble du couvert (figure 3.10.). Le jour, les écarts entre la température de l'air et celles du point de rosée sont constants. Le profil d'humidité de l'air qui suit une loi logarithmique (paragraphe 1.2.3.) en terrain plat et dégagé se réduit ici à une droite verticale.

La limitation des apports d'air sec extérieur dans le couvert forestier permet de maintenir une humidité pratiquement indépendante de la hauteur au-dessus du sol. La nuit, il existe un gradient de la température du point de rosée à proximité du sol alors que dans les strates supérieures, l'humidité ne varie pas en fonction de la hauteur. L'augmentation de la teneur en eau à proximité du sol s'explique par la diminution du coefficient d'échange dans les strates proches du sol qui empêche la vapeur d'eau émise de s'échapper malgré un vent fort (situation de mistral). On peut toutefois noter que si ces situations de mistral sont fréquentes dans la vallée du Rhône (en moyenne 40% de jours par an à Avignon)

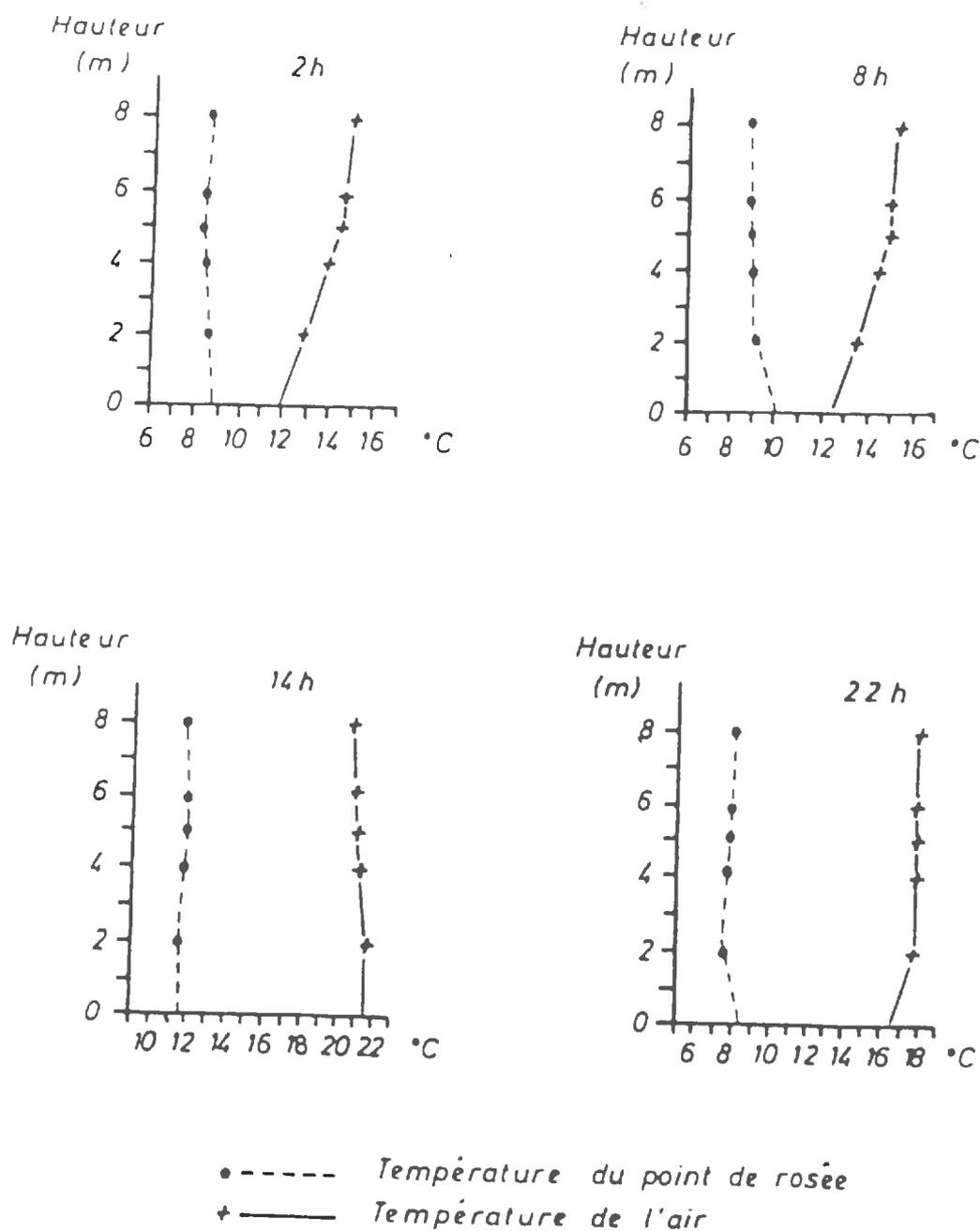


Figure 3.10.
Profils verticaux de la température du point de rosée et de la température de l'air dans la cédraie du Luberon (le 21/07/77)

elle correspondait généralement à de faibles teneurs en eau de l'atmosphère.

Le couvert forestier présente dans son ensemble une bonne homogénéité de la teneur en eau de l'air qui semble indépendante de la répartition de la masse foliaire de la cédraie. Seule une légère diminution du déficit de saturation peut être mesurée la nuit à proximité du sol.

CONCLUSIONS

Il existe à l'intérieur de la cédraie un milieu atmosphérique qui lui est propre. Les résultats expérimentaux mettent en évidence une zone de forts gradients de rayonnement solaire et de vitesse du vent à la partie supérieure de la couronne des arbres ; les strates moyennes et inférieures sont par contre caractérisées par des gradients de rayonnement solaire et de vitesse du vent faibles (jeune cédraie) ou inexistant (cédraie plus âgée). Tout ce passe pour les échanges turbulents comme si le niveau du sol était remonté à hauteur de la strate supérieure du couvert forestier. De la superposition de ces effets de la forêt sur les échanges turbulents et sur le bilan radiatif résultent des profils verticaux de température et d'humidité de l'air caractérisés par de faibles gradients sur l'ensemble du couvert forestier. La modification des échanges énergétiques à l'intérieur d'un couvert forestier crée des conditions microclimatiques différentes de celles que l'on trouve en zone ouverte. Les profils verticaux observés dans la forêt dépendent cependant du paramètre climatique et de la strate forestière considérée ainsi que des caractéristiques du climat régional.

IV. LE MICROCLIMAT DE LA PARCELLE AGRICOLE ENTOUREE DE BRISE VENT

Nous avons analysé dans les chapitres précédents la formation des microclimats à l'échelle d'un arbre puis d'un groupe d'arbres (peuplement forestier), nous nous proposons d'analyser maintenant les effets de plantations d'arbres en ligne (brise-vent) sur le microclimat de leur environnement. Ce type de paysage se rencontre fréquemment dans certaines régions particulièrement exposées au vent (Bretagne, Vallée du Rhône).

Généralement implantées pour protéger les cultures ou les animaux contre le vent, les haies brise vent modifient les conditions microclimatiques de la parcelle qu'elles entourent, ce sont ces effets des brise-vent sur le microclimat que nous allons analyser dans ce chapitre.

Dans une zone plane et dégagée, les facteurs climatiques varient à un instant donné essentiellement en fonction de l'altitude. Cette stratification verticale n'est valable que pour une zone dépourvue d'obstacles. Dans une zone cloisonnée par des haies, il existe non seulement une variation avec l'altitude mais également avec la distance qui sépare les haies du point considéré. En modifiant les transferts de masse et d'énergie, la haie crée une nouvelle structure microclimatique. Après un bref rappel sur les effets des brise-vent sur les échanges turbulents et le bilan radiatif, nous analyserons les résultats expérimentaux qui ont été acquis dans deux régions caractérisées par la présence de nombreux de brise-vent : la basse vallée du Rhône et le bocage breton.

4.1. LES EFFETS DES BRISE - VENT SUR LES ECHANGES TURBULENTS

Depuis NAEGLI (1946), JENSEN (1954), BAUMGARTNER (1961), de nombreux travaux ont fait l'objet d'études sur les effets aérodynamiques des brise-vent, des synthèses bibliographiques ont été réalisées par GUYOT (1963) et Van EIMERN et al. (1964). Des travaux plus récents : PLATE (1971), MILLER et al. (1976), GUYOT et al. (1972, 1976) ont permis de préciser le rôle des brise-vent sur les échanges d'énergie mécanique.

Nous nous proposons de rappeler ici les principaux résultats relatifs aux effets des brise-vent sur les échanges turbulents.

4.1.1. Influence de la hauteur des brise-vent

L'ensemble des travaux réalisés sur cette question a montré que l'extension de la zone protégée par un brise-vent, toutes autres conditions restant égales par ailleurs, est sensiblement proportionnelle à la hauteur du brise-vent. C'est pour cette raison que la hauteur H des brise-vent est généralement prise comme unité de mesure des distances et des altitudes.

Pour faciliter la comparaison des effets des brise vent, on utilise généralement des nombres sans dimension en rapportant la grandeur mesurée à une grandeur de référence. Pour les distances et les altitudes, l'unité de mesure sera la hauteur H du brise-vent, nous aurons alors :

- Pour les distances : $\xi = \frac{X}{H}$

- Pour les altitudes : $\eta = \frac{Z}{H}$

Il faut toutefois noter que lorsque l'on passe d'un brise-vent de faible hauteur (inférieure à 1 m) à un grand brise-vent (H supérieur à 10 m), les profils d'attaque du vent sont différents puisque l'on sait que la vitesse varie de façon logarithmique avec la hauteur au-dessus du sol (chapitre 1). Dans le cas d'un brise vent de faible hauteur, la part du vent directement influencée par la surface du sol est relativement plus importante que dans le cas d'un brise vent très haut. La similitude de l'écoulement n'est pas parfaite et la longueur de la zone protégée pourra être légèrement différente.

4.1.2. Influence de la porosité du brise-vent

L'écoulement de l'air au voisinage d'un brise-vent dépend également de sa porosité qui est définie pour un brise-vent sans épaisseur comme le rapport de la surface des ouvertures à la surface frontale totale.

L'influence de la porosité d'un brise-vent sur la réduction de la vitesse du vent a été mise en évidence dès 1953 par NAEGLI. Les réseaux de courbes isovitesses (isotaques) obtenus au voisinage de brise-vent perméable et imperméable (GUYOT, 1969) illustrent l'effet de la porosité des brise-vent sur l'écoulement de l'air (figures 4.1. et 4.2.). Le brise-vent imperméable dévie la veine incidente vers le haut en créant une survitesse au niveau de l'arête supérieure du brise-vent. Parallèlement, il se produit une diminution de pression statique derrière le brise-vent (effet COANDA). La combinaison des deux effets provoque un tourbillon dont l'axe est horizontal et parallèle au brise-vent. Lorsque le brise-vent est perméable, une partie seulement du flux d'air incident est déviée ; par ailleurs le débit d'air traversant le brise-vent s'oppose à la formation du tourbillon. Ainsi la veine défléchie se rabat plus rapidement vers le sol derrière le brise-vent imperméable et la zone protégée est réduite par rapport à celle observée au voisinage d'un brise-vent perméable.

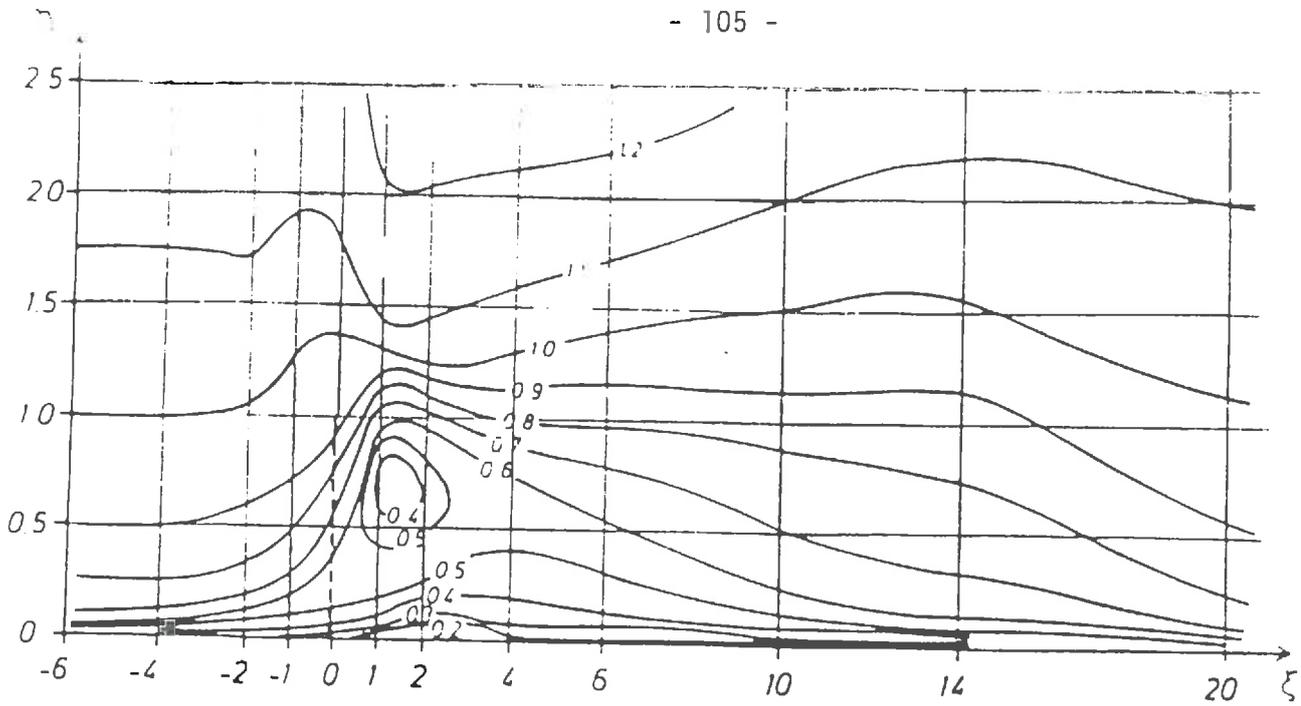


Figure 4.1.
Isotaques au voisinage d'un brise vent perméable ($\phi = 0,50$). La vitesse de référence est mesurée au niveau de l'arête supérieure du brise vent (2m). ϕ est la porosité du brise vent.

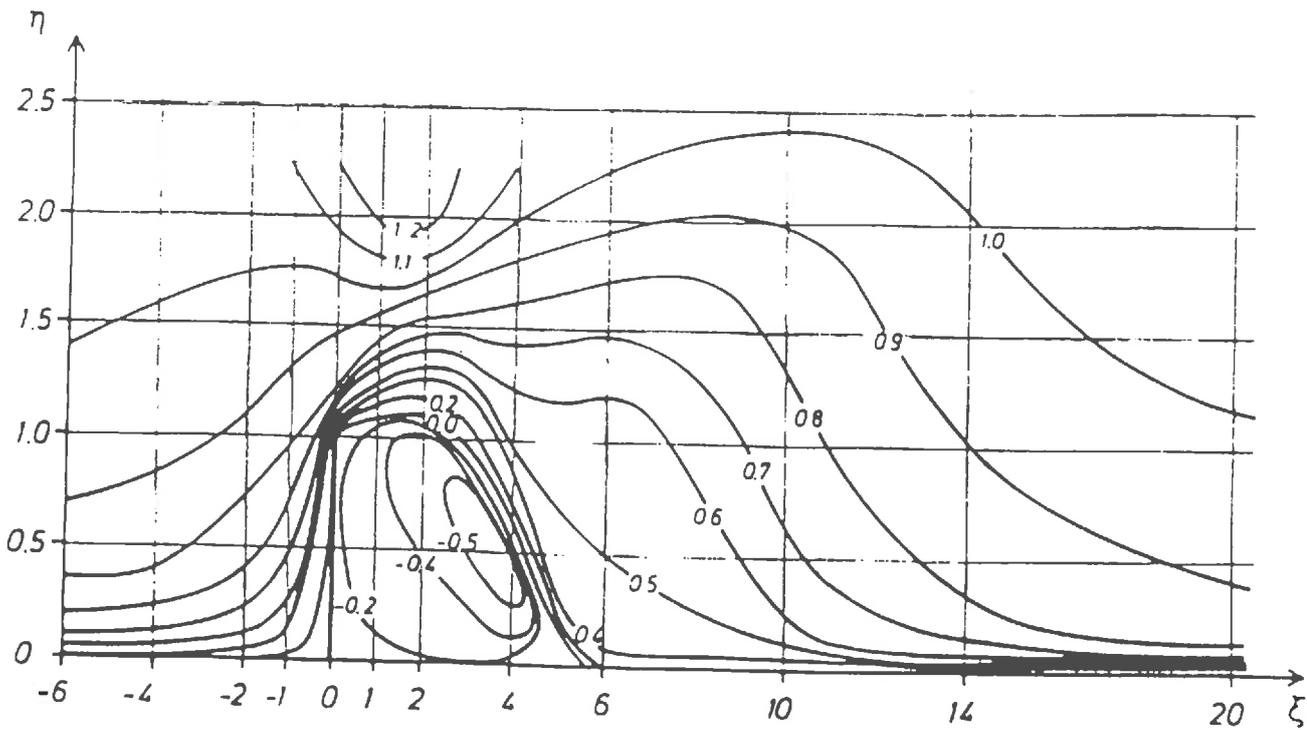


Figure 4.2.
Isotaques au voisinage d'un brise vent imperméable. La vitesse de référence est mesurée au niveau de l'arête supérieure du brise vent (2m) (d'après GUYOT et al., 1969).

Il existe une porosité qui assure une protection optimale, cette dernière pouvant être définie par le produit de la réduction de la vitesse du vent par la longueur de la zone d'action du brise-vent. On admet que la porosité optimale se situe entre 30 et 50 % selon le type de climat et la nature des cultures.

En plus de la porosité optique, un autre paramètre caractérise l'efficacité du brise-vent : le coefficient de perte de charge qui dépend de la forme et de la dimension des surfaces poreuses du brise-vent. Les résultats expérimentaux (GUYOT, 1972) ont montré que la protection maximale était obtenue pour un coefficient de perte de charge voisin de 2,8.

La variation verticale de porosité que l'on observe sur les brise-vent naturels a été simulée à l'aide d'un brise-vent constitué par 3 bandes plastiques de porosité variable. Dans un premier cas, pour simuler les brise-vent sur talus une bande de plastique imperméable a été placée à la base du brise-vent puis, au-dessus, une bande à fort coefficient de perte de charge (5,50) et enfin à la partie supérieure une bande à faible coefficient de perte de charge (1,30). Dans cet exemple, on observe que le brise-vent se comporte sensiblement comme un brise-vent imperméable (figure 4.3.). Au contraire, lorsque la bande perméable est située à la base du brise-vent, les courbes isovitesses obtenues sont sensiblement identiques à celles obtenues lorsque le brise-vent est constitué par une toile perméable sur toute sa hauteur (figure 4.4.). La porosité de la bande située au niveau inférieur est donc déterminante dans la répartition de l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle poreux.

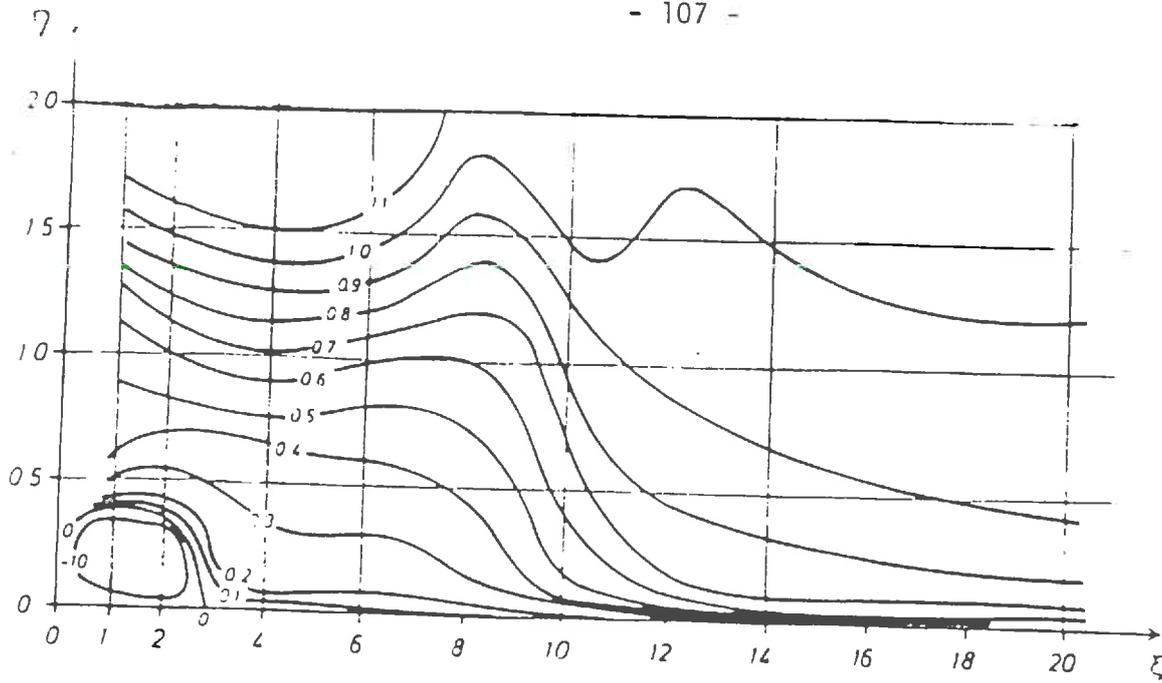


Figure 4.3.

Isotaques au voisinage d'un brise vent constitué par trois bandes de porosités différentes (bande imperméable en bas).

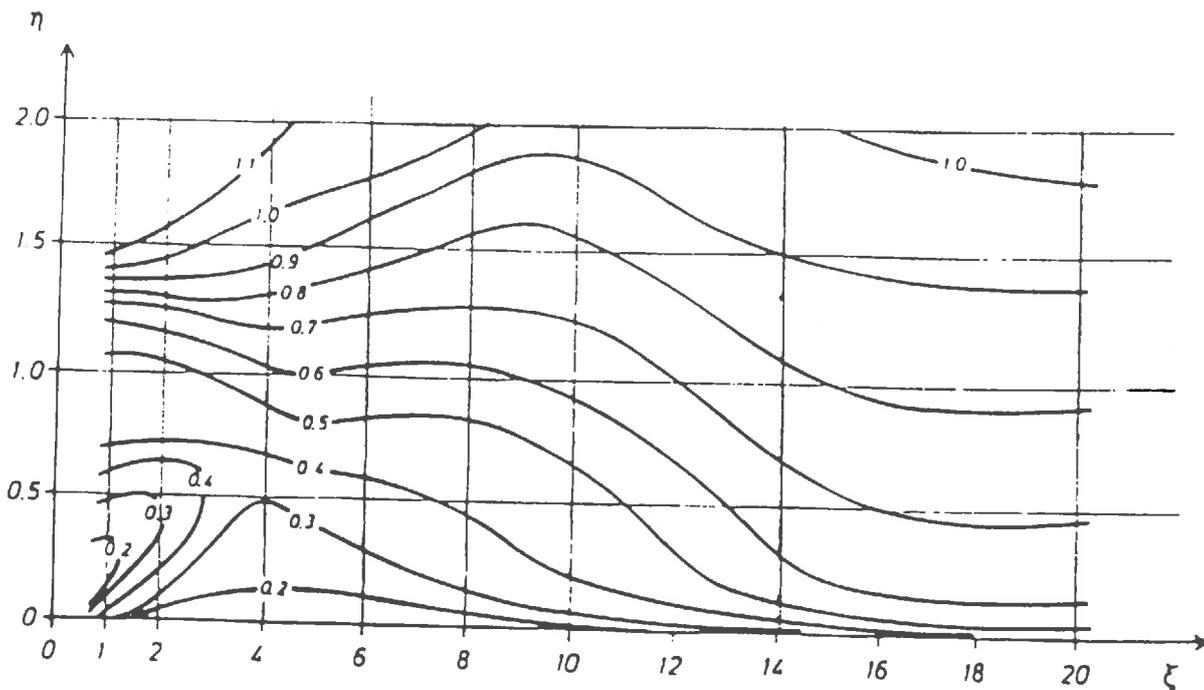


Figure 4.4.

Isotaques au voisinage d'un brise vent constitué par trois bandes de porosités différentes (bande imperméable en haut).

4.1.3. Influence des caractéristiques du vent

a. Rôle de la vitesse du vent

De nombreux auteurs ont montré que la réduction la vitesse du vent derrière un brise-vent était indépendante de la vitesse de référence mesurée en zone ouverte (WOODRUFF, 1954 ; BLENK et TRIENES, 1956). Ces résultats sont relatifs à des mesures faites en soufflerie. Dans les conditions naturelles sur des brise-vent artificiels de géométrie bien définie, les mêmes résultats sont observés (NAEGLI, 1946 ; GUYOT, 1972). Lorsque les essais sont effectués sur des brise-vent naturels, le vent modifie la porosité des arbres. Les feuilles des brise-vent de feuillus ont tendance à se placer parallèlement à l'écoulement augmentent ainsi la porosité du brise-vent et modifient ses effets aérodynamiques. Lorsque les brise-vent sont constitués de conifères, les branches se plaquent les unes contre les autres lorsque la vitesse du vent augmente, la porosité du brise-vent est réduite ainsi que son efficacité.

b. Rôle de la rugosité du plan

Dès 1954, JENSEN montrait que l'efficacité d'un brise-vent diminuait lorsque la rugosité du sol augmentait, toutes autres conditions restant égales par ailleurs. Pour une même porosité, les effets aérodynamiques dépendent de la forme de l'écoulement qui est liée à la rugosité du sol (GUYOT, 1972, 1976). La rugosité du plan est généralement exprimée sous une forme adimensionnelle par le rapport $\eta_0 = (Z_0/H)$, Z_0 étant le paramètre de rugosité de sol et H étant la hauteur des brise-vent. L'efficacité du brise vent est d'autant plus grande que η_0 est petit (GUYOT, 1972).

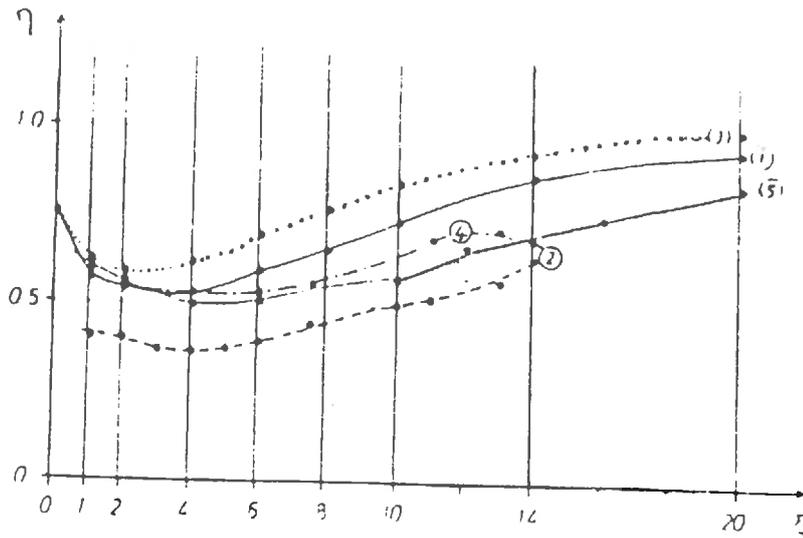
c. Rôle de la stabilité de l'atmosphère

La stabilité de l'air au voisinage du sol est également un facteur pouvant modifier les effets aérodynamiques des brise-vent. Lorsque l'air est instable, le jour par temps calme et ensoleillé (forts gradients de températures et faible vitesse du vent), les mouvements ascendants sont amplifiés et une partie du flux incident passe au-dessus du brise-vent. Ce phénomène ne s'observe pas lorsque l'air est stable.

De nombreux auteurs Van EIMERN (1957), ROSENBERG (1966) et SEGNER (1975) ont montré que l'extension de la zone de protection des brise-vent était plus faible dans une situation d'air instable. Les brise-vent seront donc, en général, plus efficaces la nuit que le jour.

d. Rôle de la turbulence de l'écoulement

Des expériences réalisées en climat tempéré (région parisienne) avec un vent peu turbulent et en climat méditerranéen avec un vent très turbulent ont montré qu'un même type de brise-vent pouvait avoir des effets aérodynamiques variables selon le site d'étude (GUYOT, 1972). Les mesures étaient effectuées dans des conditions de neutralité thermique (l'hiver) et avec des paramètres de rugosité du sol voisins sur les deux sites. Les figures 4.5. et 4.6. mettent en évidence les effets de la turbulence sur la réduction de la vitesse du vent à l'aval d'un brise-vent aussi bien dans des conditions naturelles (GUYOT et al., 1972, 1976) qu'en conditions artificielles (GUYOT, 1972 ; MURUGO, 1975).



1. Grille n° 2 Montfavet, $\Phi = 0,49$, $\zeta = 2,65 - 2,82$
2. Grille n° 2 La Minière,
3. Grille n° 1 Montfavet, $\Phi = 0,52$, $\zeta = 1,39 - 1,42$
4. Grille n° 1 La Minière,
5. Grille n° 5 La Minière, $\Phi = 0,65$, $\zeta = 1,33$

Figure 4.5.

Variations de la vitesse du vent $U(\xi, \eta)$ au niveau $\eta = 0,5$ pour différents types de grilles (porosité (Φ) et coefficient de perte de charge (ζ) variables) dans la région parisienne (La Minière) et dans la région méditerranéenne (Montfavet).

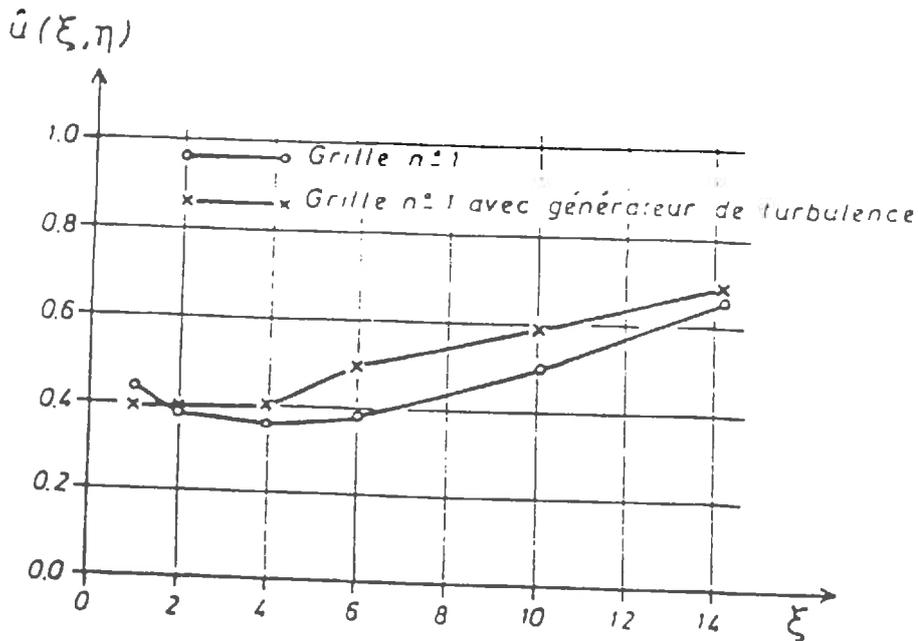


Figure 4.6.

L'influence de la turbulence sur la vitesse du vent mesurée à l'aval d'un brise vent ($\Phi = 0,53$; $\zeta = 2$)

1. Sans générateur de turbulence
2. Avec générateur de turbulence (barreaux cylindriques horizontaux (d'après MURUGO, 1975))

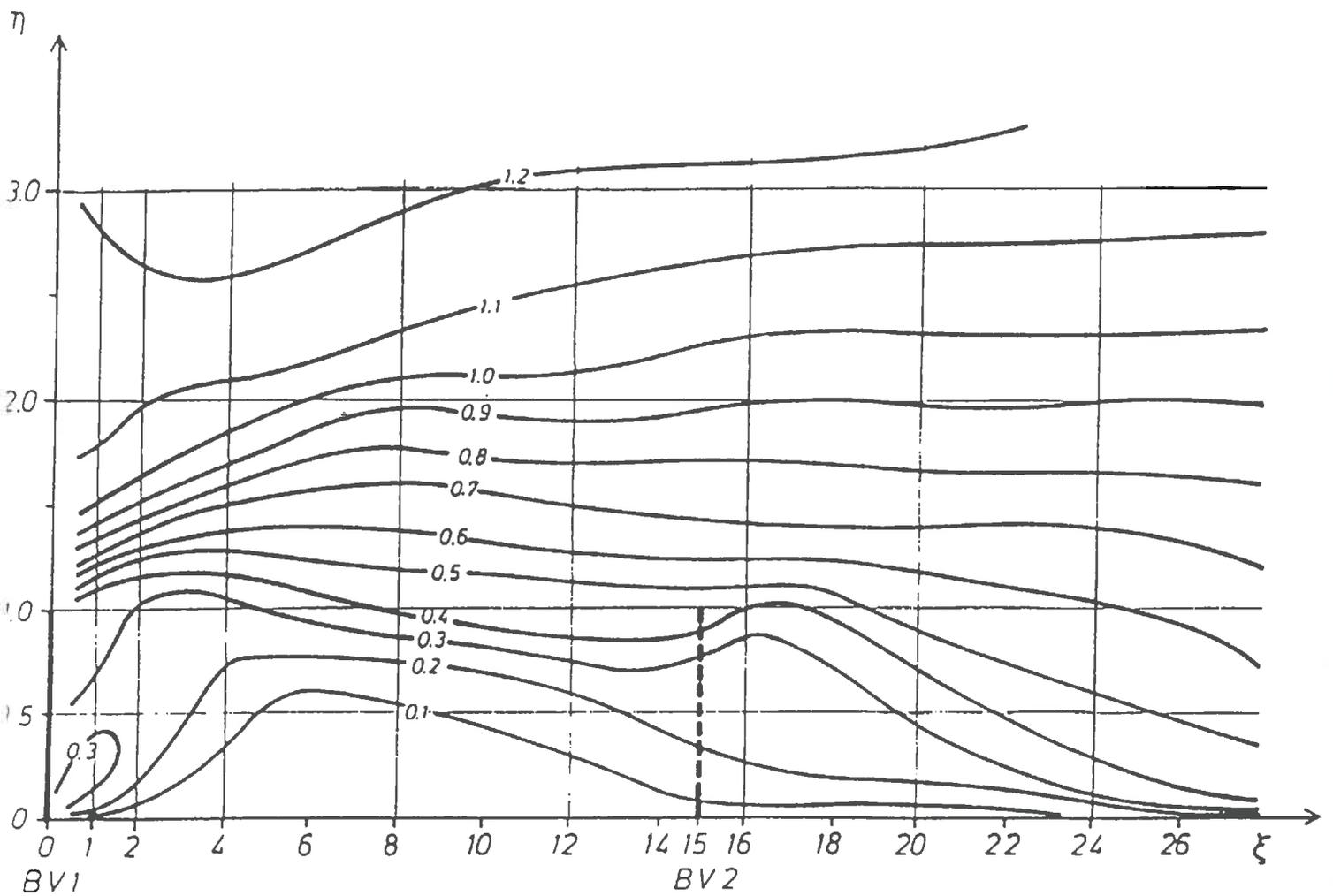


Figure 4.7.
Réseau de courbes isovitesse, tracé au voisinage de deux modèles réduits de
brise-vent espacés de 15 fois leur hauteur, en soufflerie

L'augmentation de la turbulence provoque une augmentation du nombre de tourbillons qui vont faciliter le mélange entre l'air à vitesse réduite (zone de sillage) et l'air à vitesse plus élevée qui est passé au-dessus du brise-vent, ce mélange va donc limiter la zone de protection du brise-vent. Ce processus d'augmentation du taux de turbulence se retrouve dans des situations où les brise-vent se succèdent. Les mesures que nous avons faites en soufflerie montrent que les isotaques se rabattent beaucoup plus rapidement vers le sol à l'aval du second brise-vent que le premier (figure 4.7.).

Cette diminution de l'efficacité des brise-vent en réseau liée à l'augmentation du taux de turbulence, doit être prise en compte lors de problèmes d'aménagement.

4.2. LES EFFETS DES BRISE-VENT SUR LE BILAN RADIATIF

La haie modifie les composantes du bilan radiatif de son espace environnant. Ces effets sont complexes, pour en simplifier la présentation, nous distinguerons d'une part les effets des haies sur le rayonnement de courte longueur d'onde (rayonnement solaire direct) et d'autre part, les effets sur le rayonnement de grande longueur d'onde (rayonnement atmosphérique et rayonnement du sol).

Le schéma de la figure 4.8. illustre les effets des brise-vent sur les échanges radiatifs de courte et grande longueur d'onde.

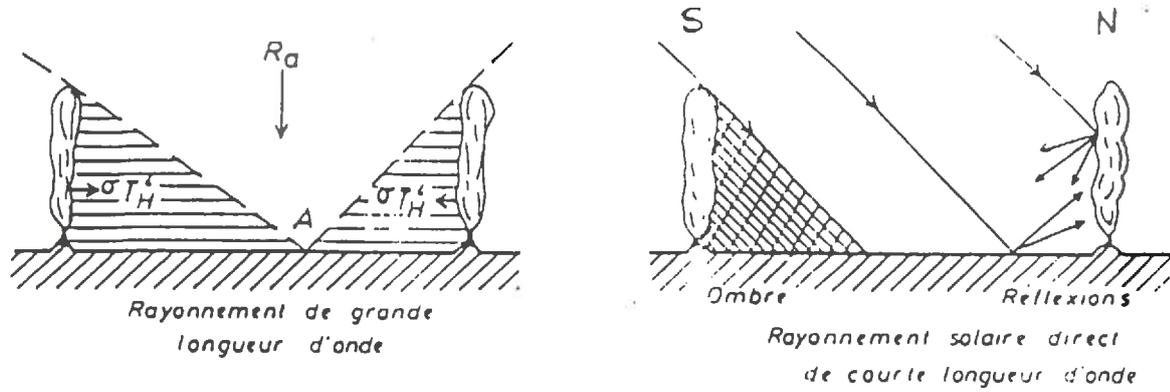


Figure 4.8. Schéma illustrant les effets des brise vent à l'échelle parcellaire sur les échanges radiatifs de courte et de grande longueur d'onde (d'après GUYOT et al., 1976)

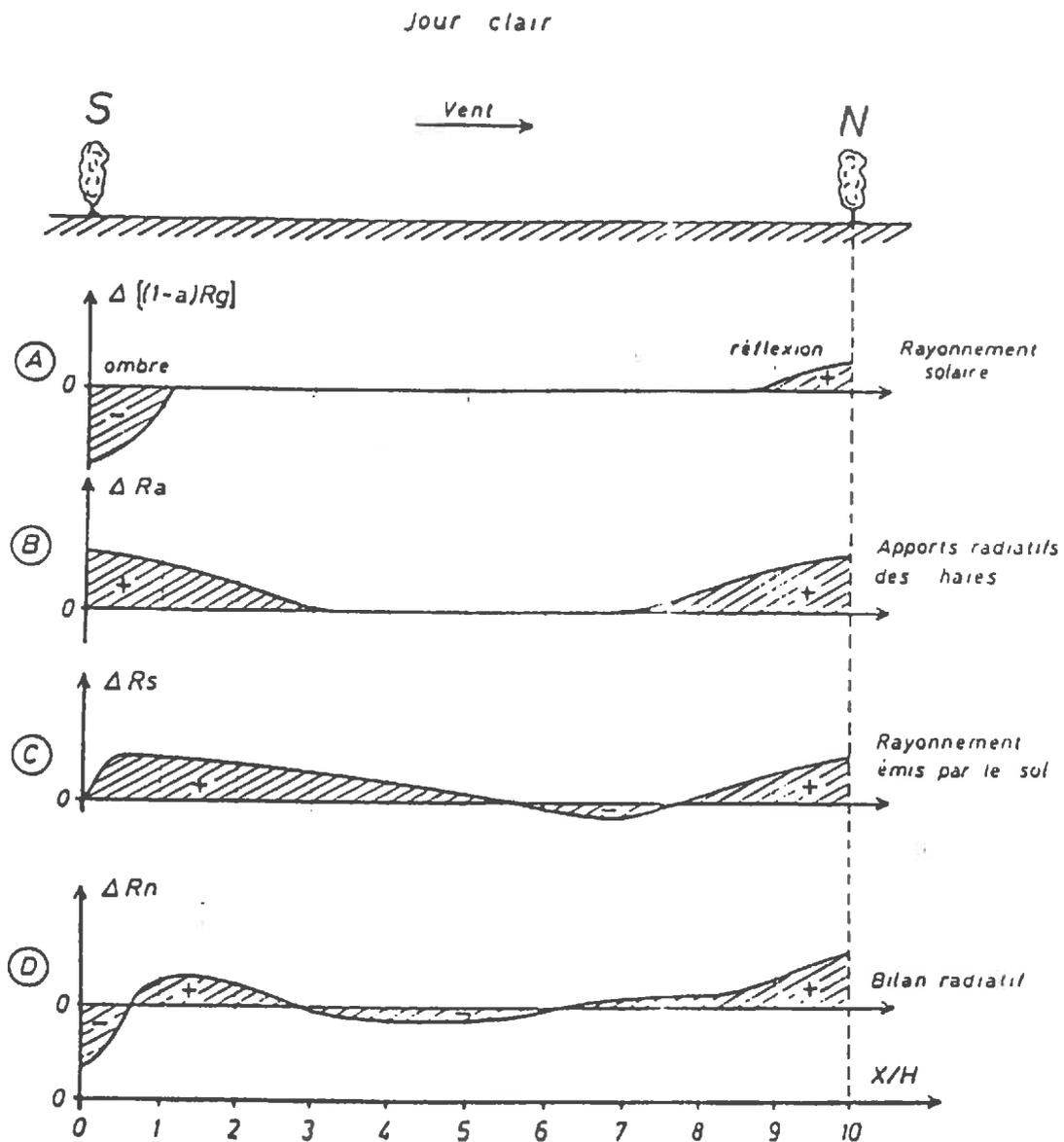


Figure 4.9. Représentation des effets des brise vent sur le bilan radiatif au cours d'une belle journée. Différence de rayonnement net entre la parcelle entourée de brise vent et une zone ouverte est donnée par $\Delta RN = \Delta(1 - a)G + \Delta R_a - \Delta R_s$ (d'après GUYOT et al., 1976)

Influence de la haie sur le rayonnement de courte longueur d'onde

Par ciel clair, la haie modifie les caractéristiques du rayonnement global incident en réduisant l'intensité de l'énergie solaire reçue au sol du côté de la haie opposé au soleil. Il se forme une zone d'ombre dont l'extension dépend de la géométrie de la haie (hauteur, azimuth, porosité optique...), cette zone d'ombre ne dépasse pas une fois la hauteur d'une haie Est-Ouest en été (SIMON, 1977). Par ailleurs, les réflexions sur la haie augmentent l'intensité du rayonnement visible et proche infrarouge reçu au sol du côté de la haie exposé au soleil. Lorsque le ciel est couvert, le rayonnement diffus représente une part importante du rayonnement global (80 à 100 %). Dans ces conditions, la haie peut par masquage du ciel réduire l'intensité du rayonnement global d'environ 10 % sur une distance qui n'excède pas 3 fois sa hauteur (GUYOT, VERBRUGGHE, 1976).

Influence de la haie sur le rayonnement infrarouge thermique

Des études théoriques (CHIAPALE, 1975) ont montré que la haie modifiait le rayonnement infrarouge thermique sur une distance comprise entre 3 et 4 fois sa hauteur. En effet, au rayonnement atmosphérique reçu au niveau du sol s'ajoute le rayonnement thermique propre à la haie dont la température de surface est toujours supérieure à la température radiative de l'atmosphère.

Influence d'une haie sur le rayonnement émis par le sol

Le rayonnement thermique émis par le sol dépend de sa température de surface. La haie, par son action sur les apports radiatifs d'une part et sur les échanges d'énergie mécanique d'autre part, va modifier la répartition spatiale du rayonnement émis par le sol.

De façon simplifiée, on peut dire que la température de surface du sol sera d'autant plus élevée que les apports radiatifs (soleil et haie) seront importants et la vitesse du vent réduite.

C'est la combinaison de l'ensemble de ces modifications qui détermine le bilan énergétique à proximité d'une haie.

Les différents effets d'une haie sur le bilan radiatif pour une belle journée avec vent sont schématisés sur la figure 4.9.

La haie modifie le bilan radiatif au niveau de la parcelle agricole en augmentant l'hétérogénéité spatiale du rayonnement au niveau du sol. Cette hétérogénéité crée une richesse de microclimats favorables à l'adaptation d'une plus grande diversité de populations animales et végétales et par suite à un équilibre biologique plus stable.

Influence de la densité des obstacles sur la répartition énergétique

Les effets d'un ensemble d'obstacles peuvent être analysés à partir des variations d'albédo. Ce terme est défini comme le rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente.

Les valeurs de ce paramètre dépendent essentiellement de la structure et des caractéristiques géométriques et optiques éléments qui constituent le paysage étudié, l'albédo étant mesuré à un niveau qui le rend indépendant des influences locales.

Un modèle mathématique a été mis au point (CHIAPALE, 1974), il permet à partir d'hypothèses simplificatrices (haies opaques au rayonnement, orientées est-ouest, réflexions obéissant à la loi de Lambert, rayonnement solaire direct seul pris en compte) d'étudier la variation de l'albédo en fonction de la densité de la végétation. Un exemple de variation de l'albédo d'une zone cloisonnée par des haies de 10 m de haut, de 2 m d'épaisseur et orientée Est-Ouest est illustré sur la figure 4.10. Le calcul a été fait pour le 150ème jour de l'année à midi, l'albédo de la haie étant supposé égal à celui du sol ($a = 0,2$).

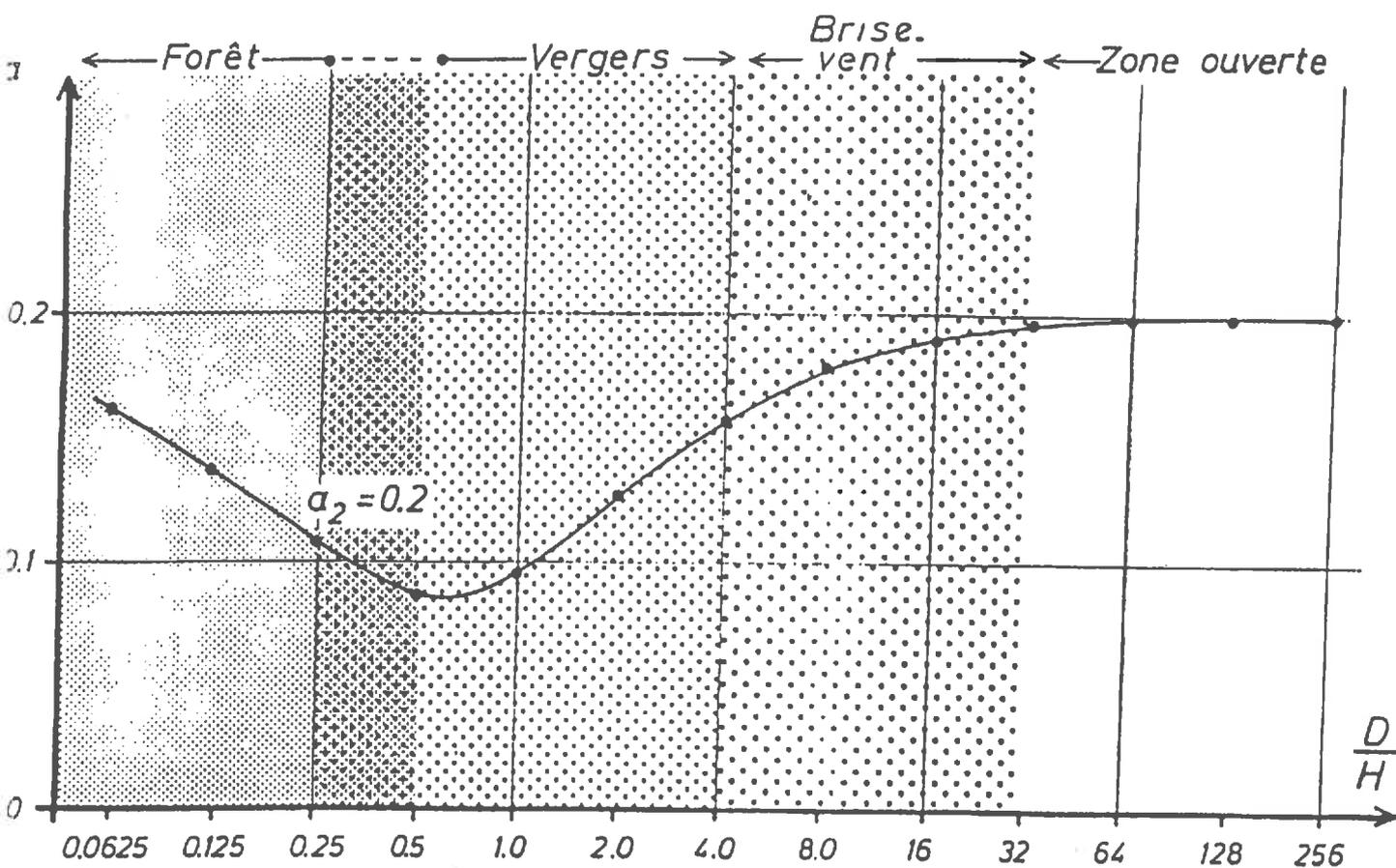


Figure 4.10.

Variation de l'albédo régional a en fonction de l'espacement des brise vent successifs. Le 150ème jour de l'année à 12 heures à la latitude de 44° Nord. Les brise vent sont supposés être orientés Est-Ouest, ils ont 10 m de haut et 2 m de large. (CHIAPALE, 1974).

Lorsque le couvert végétal ou forestier est dense, l'albédo est celui de la masse végétale qui recouvre le sol ; lorsque le couvert végétal est très peu dense ou les haies très espacées, l'albédo est celui du sol. Ainsi, dans l'exemple cité, l'albédo passe par une valeur minimale de 0,09 pour un l/H (l : espacement des haies, H : hauteur des haies) de 0,6 qui correspond approximativement à une structure de type verger (figure 4.10.). C'est donc cette structure qu'il est souhaitable d'utiliser pour bénéficier du maximum d'énergie ainsi piégée par une plantation en ligne.

4.3. ANALYSE DE RESULTATS EXPERIMENTAUX

4.3.1. Sites et dispositifs expérimentaux

Les études expérimentales dont nous avons la responsabilité ont été réalisées dans deux régions agricoles dont l'aménagement est caractérisé par la présence de nombreux brise-vent : les régions bocagères du sud de la Bretagne et celles de la basse Vallée du Rhône.

Les sites retenus dans le bocage breton étaient représentatifs de chacune des grandes régions agricoles du Morbihan (Le Vannetais, Les Monts Bretons, la région de Redon). Chaque site expérimental était constitué de deux communes voisines, l'une remembrée dans laquelle les haies ont été partiellement ou totalement arasées et l'autre non remembrée (figure 4.11.). Les deux communes ont été choisies de façon à être aussi semblables que possible du point de vue du relief de la distance à la mer et de la structure antérieure du bocage. Les parcelles choisies avaient une superficie de 1 à 3 ha, les haies étaient

essentiellement composées d'arbustes buissonnants sur talus (prunelles, aubépine) d'ajoncs et de quelques chênes dans les communes du littoral et de chênes têtards, hêtres, charmes et érables dans les communes de l'intérieur du département. La hauteur des haies était variable 1 à 4 m en bordure du Golfe du Morbihan 8 à 12 m dans les communes de l'intérieur. Ces travaux, où nous étions plus spécialement chargés des études sur le terrain a fait l'objet d'un rapport détaillé (GUYOT et al., 1976), nous ne présenterons ici que des résultats illustrant les effets du bocage sur les modifications microclimatiques à l'échelle de la parcelle.

L'expérimentation sur les brise-vent dans la basse Vallée du Rhône a été effectuée sur les terrains expérimentaux situés sur la commune de Montfavet à 9 km à l'Est d'Avignon. Le dispositif expérimental a été implanté sur deux parcelles contigües et représentatives du paysage des zones de polycultures maraîchères de la basse Vallée du Rhône. Les parcelles étaient protégées des vents dominants du Nord (Mistral) par des brise-vent orientés Est-Ouest et constitués par une rangée de cyprès doublée au nord par des cannes de Provinces sèches. Les haies d'une hauteur moyenne de 6 m étaient distantes de 45 m pour la parcelle nord dont la superficie est de 0,7 ha et de 25 m pour la parcelle sud et dont la superficie est de 0,4 ha.

Notre présentation sera orientée sur les effets aérodynamiques des haies ainsi que sur les effets des haies sur la température et l'humidité de l'air à l'échelle de la parcelle.

Les études sur les effets microclimatiques des brise-vent nous ont amené à utiliser des dispositifs expérimentaux originaux.

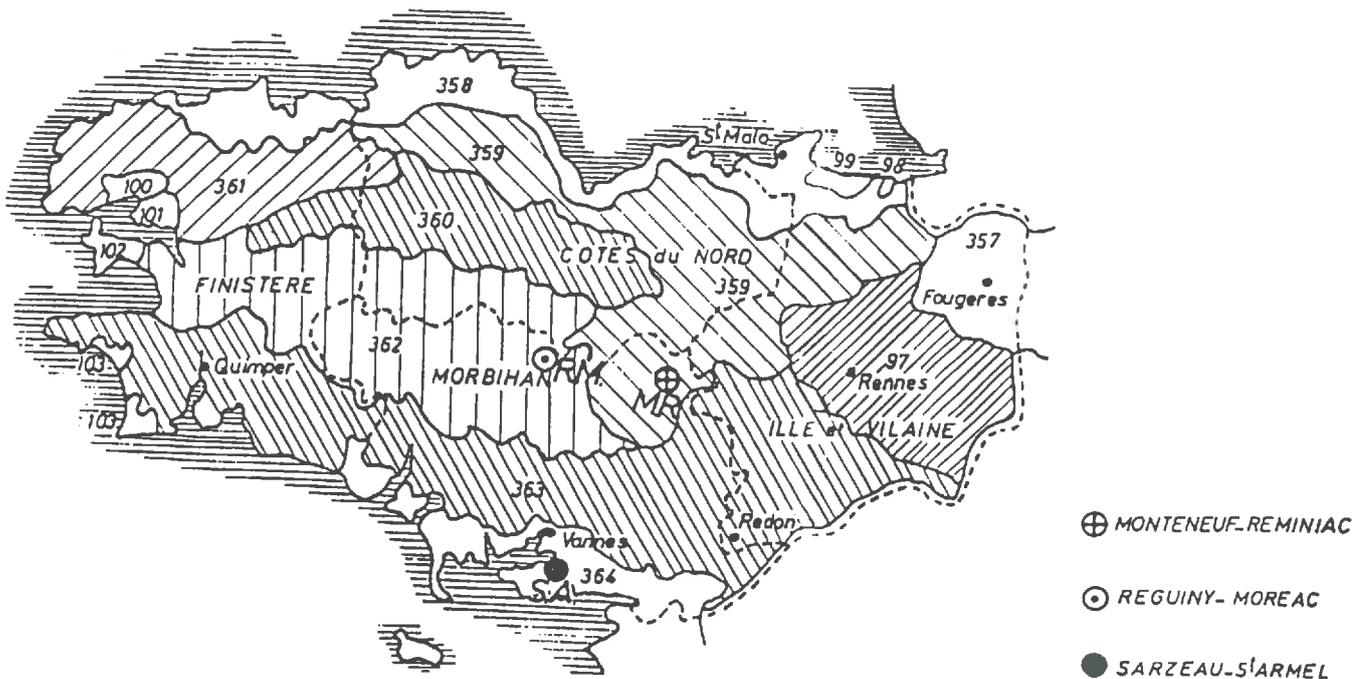


Figure 4.11.

Carte des régions agricoles de Bretagne et localisation des sites expérimentaux

- 97 : Région Centrale (Ille et Vilaine)
- 98 : Polders du Mont St-Michel
- 99 : Marais de Dol
- 100 : Zone côtière de Brest
- 101 : Zone de Plougastel
- 102 : Presqu'île de Crozon
- 103 : Zone légumière de la Pénéplaine Sud
- 357 : Région de Fougères
- 358 : Littoral Breton Nord
- 359 : Bretagne Centrale
- 360 : Monts d'Arrée
- 361 : Pénéplaine Bretonne Nord
- 362 : Région Nord du Morbihan et Sud-Ouest des Côtes du Nord
- 363 : Pays de Pedon
- 364 : Littoral Breton Sud

La caractérisation microclimatique des parcelles bocagères a été réalisée à l'aide d'un matériel spécialement adapté à ce type d'études sur le terrain. Les capteurs de température, d'humidité et de rayonnement utilisés sont ceux qui ont été décrits dans le chapitre I. Les supports de ces capteurs étaient constitués par 5 mâts de 6 m de haut montés sur traineaux mobiles et par 3 pylones de 30 m implantés au centre des parcelles. L'ensemble de ces mesures était transmis par câbles à des systèmes d'acquisition de données CIMEL, les mesures anémométriques étaient centralisées sur des ensembles de comptage spécialement conçus pour les mesures sur le terrain (GUYOT et al., 1976).

Toutes les mesures étaient enregistrées simultanément dans les parcelles bocagères et remembrées de façon à faciliter la comparaison des mesures.

Par ailleurs, des mesures microclimatiques ont été effectuées dans des parcelles de cultures maraîchères de la Basse Vallée du Rhône sur le domaine expérimental St-Maurice de l'INRA de Montfavet. Nous nous sommes ici plus spécialement intéressés à une analyse très fine de la variabilité spatiale de la température de l'air. Cette dernière était mesurée à l'aide de thermosondes placées dans des prises ventilées, les températures moyennes horaires étaient centralisées sur un système d'acquisition de type Bruyère.

Les capteurs étaient disposés selon un axe Nord Sud à 1 m du sol et en 15 points répartis dans les deux parcelles, à des distances égales à des multiples de la hauteur de la haie située au Nord des parcelles expérimentales.

4.3.2. Les effets aérodynamiques

Les principaux mécanismes relatifs aux échanges d'énergie mécanique à proximité des brise-vent ont été rappelés au paragraphe 4.1., nous allons présenter ici les résultats expérimentaux qui permettent de préciser les effets aérodynamiques des brise-vent dans le bocage. L'analyse des résultats portera sur 3 situations :

- Une parcelle de bocage du littoral (Sarzeau) entourée de haies basses et denses constituées de genêts et d'arbustes buissonnants sur talus, en automne.
- Une parcelle de la région de Redon (Réguiny), entourée de chênes pédonculés sur talus, l'été.
- La même parcelle entourée de chênes éfeuillés l'hiver.

L'influence de la topographie et celle de l'environnement sur l'écoulement de l'air au niveau d'une parcelle seront ensuite discutées.

L'écoulement de l'air est visualisé sur les graphiques qui vont être présentés par un réseau d'isotaques obtenus à partir de profils verticaux de vitesse du vent. Les vitesses sont exprimées en fonction des mesures faites à 2,5 m du sol en zone dégagée. Les courbes d'égales vitesses horizontales ainsi obtenues permettent de visualiser les mouvements d'air et l'influence de la haie sur la répartition du vent dans la parcelle.

a. Cas d'une parcelle entourée de haies peu perméables

Des mesures ont été effectuées dans une parcelle du site maritime, il s'agit d'une parcelle de forme irrégulière d'une superficie d'environ 2 ha et entourée de haies très denses de 6 à 8 m de haut. L'exploration anémométrique a été faite selon un axe Est-Ouest de 174 m de long pour des vents ayant une direction parallèle à cet axe. Les résultats des mesures sont illustrés sur la figure 4.12.

Les isotaques sont tracées en fonction de la distance réduite X/H ou X représente la distance à la haie et H la hauteur de la haie. La partie droite de la figure représente pour la zone ouverte les variations verticales de la vitesse réduite U/U_0 où U représente la vitesse au niveau Z et U_0 la vitesse au niveau de référence 2,5 m.

Les isotaques mettent en évidence le rabattement rapide de l'écoulement de l'air vers le sol à l'aval de la haie dans la zone qui s'étend jusqu'à environ $7 H$. Dans cette zone, la vitesse est réduite de 60 à 80 % par rapport au témoin selon le niveau considéré. Au-delà de $7 H$ et jusqu'à $25 H$, on observe, dans la couche 0 - 2 m une réduction sensiblement constante de la vitesse qui se situe entre 40 et 70 %. Au-dessus de 2 m, on remarque une diminution rapide de l'épaisseur de la zone de protection. A proximité de la haie est, il existe une remontée des isotaques dues à l'augmentation de la pression de l'air sur la haie. Il apparaît une similitude des isotaques obtenues ici derrière un brise-vent naturel dense avec celles observées derrière un brise vent artificiel imperméable (paragraphe 4.1.2.). Cependant, l'étendue de la zone d'action du brise-vent est plus importante en situation de bocage puisqu'elle atteint $25 H$ alors que pour le brise-vent isolé, la zone protégée n'excède pas dans le cas le plus favorable $15 H$.

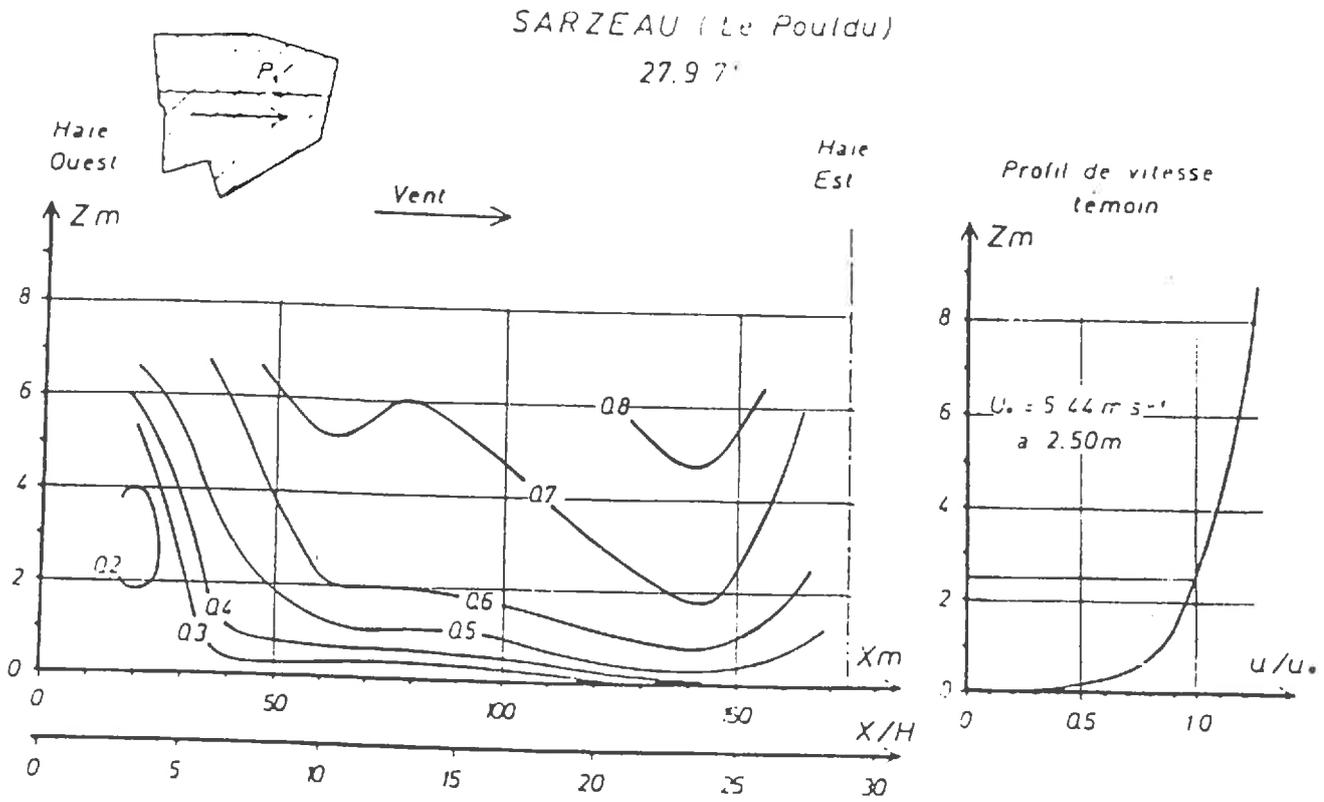


Figure 4.12.

Isotaques dans une parcelle bocagère entourée de haies denses et peu perméables et profil vertical en zone ouverte.

Ceci peut s'expliquer par une superposition des effets de la haie qui entoure la parcelle et de ceux des haies plus éloignées qui modifient les échanges turbulents en créant un effet de protection régionale au niveau de la parcelle d'étude.

Le tableau 4.1. montre que les mesures faites sur ce site à des dates différentes sont très proches : le profil vertical des vitesses réduites est sensiblement constant, les vitesses mesurées à différentes distances du brise-vent sont également constantes, l'écart maximal n'excédant pas 10 %.

Date	Altitude (m)	Témoïn	Distance à la mare Ouest m.							
			10	20	40	60	80	124	144	164
27/09/71	6,00	1,19	0,57	0,43	0,60	0,74	0,70	0,78	0,84	0,71
	4,00	1,12	0,43	0,31	0,54	0,66	0,85	0,75	0,75	0,65
	2,50	1,00	0,34	0,23	0,47	0,64	0,63	0,89	0,75	0,51
	1,50	0,89	0,28	0,18	0,44	0,57	0,57	0,64	0,70	0,57
	0,75	-	0,24	0,15	0,37	0,41	0,43	-	0,62	0,50
20/03/71	6,00	1,19	-	-	0,64	-	0,80	0,85	0,88	-
	4,00	1,12	-	-	0,56	-	0,75	0,81	0,84	-
	2,50	1,00	-	-	0,48	-	0,70	0,77	0,80	-
	1,50	0,89	-	-	0,43	-	0,65	0,71	0,74	-
	0,75	-	-	-	-	-	0,50	-	0,65	-
27/03/71	6,00	1,20	-	-	-	-	0,77	0,86	0,89	0,88
	4,00	1,12	-	-	-	-	0,72	0,81	0,84	0,83
	2,50	1,00	-	-	-	-	0,68	0,78	0,81	0,77
	1,50	0,90	-	-	-	-	0,61	0,70	0,74	0,72
	0,75	-	-	-	-	-	0,53	-	0,67	0,60

La vitesse réduite indiquée est le rapport de la vitesse mesurée en un point $U(x,z)$ à la vitesse de référence U_0 , mesurée dans la zone ouverte à 2,5 m du sol.

Tableau 4.1.

Valeurs moyennes des vitesses réduites du vent mesurées les 20 et 27 août et le 27 septembre 1971 avec un vent d'Ouest dans la parcelle test

b. Cas d'une parcelle entourée d'une haie de brise-vent naturels perméables

Les résultats expérimentaux relatifs aux effets aérodynamiques des haies perméables sont présentés pour une parcelle bordée de chênes têtards plantés sur un talus de terre et pour une situation d'hiver et d'été (figures 4.13. et 4.14.). La hauteur des haies est de 8 à 10 m et la superficie de la parcelle d'environ 1 ha. Les isotaques ont été tracées avec les mêmes conventions que précédemment. Lorsque les arbres sont effeuillés, les isotaques sont pratiquement parallèles au sol, l'efficacité aérodynamique n'est cependant pas négligeable puisqu'à 2,5 m du sol, la réduction de la vitesse du vent est de l'ordre de 30 à 35 % sur toute l'étendue de la parcelle. Cette réduction de la vitesse est la résultante de la protection des haies qui bordent la parcelle mais aussi des haies situées plus en amont. De plus, un effet topographique vient se superposer à celui des haies en effet la parcelle se trouve sur une pente d'environ 3 % qui provoque une réduction non négligeable de la vitesse du vent (paragraphe 4.3.2.). La présence de feuilles se traduit par des isotaques s'inclinant progressivement vers le sol entre 0 et 6 H, et par une réduction accrue de la vitesse du vent qui à 2,5 m du sol varie entre 65 % à 2 H et 45 % à 8 H.

Ainsi, les cartographies de vent à l'échelle de la parcelle ont permis de mettre en évidence outre l'effet des brise-vent entourant la parcelle, un effet plus régional du bocage. Cet effet régional crée une protection plus étendue dans les parcelles que celle observée derrière un brise vent isolé.

Cet effet régional n'est effectif que lorsque le réseau de brise-vent est suffisamment étendu nous avons vu (paragraphe 4.1.3.d) que l'efficacité de deux brise-vent était moindre que celle d'un brise-vent isolé. Il est donc nécessaire que la couche limite régionale soit pleinement développée pour que l'effet régional du bocage se manifeste au niveau d'une parcelle.

Lorsqu'un brise-vent est situé à l'intérieur d'un réseau de protection, l'écoulement de l'air au niveau de la parcelle est soumis à deux effets :

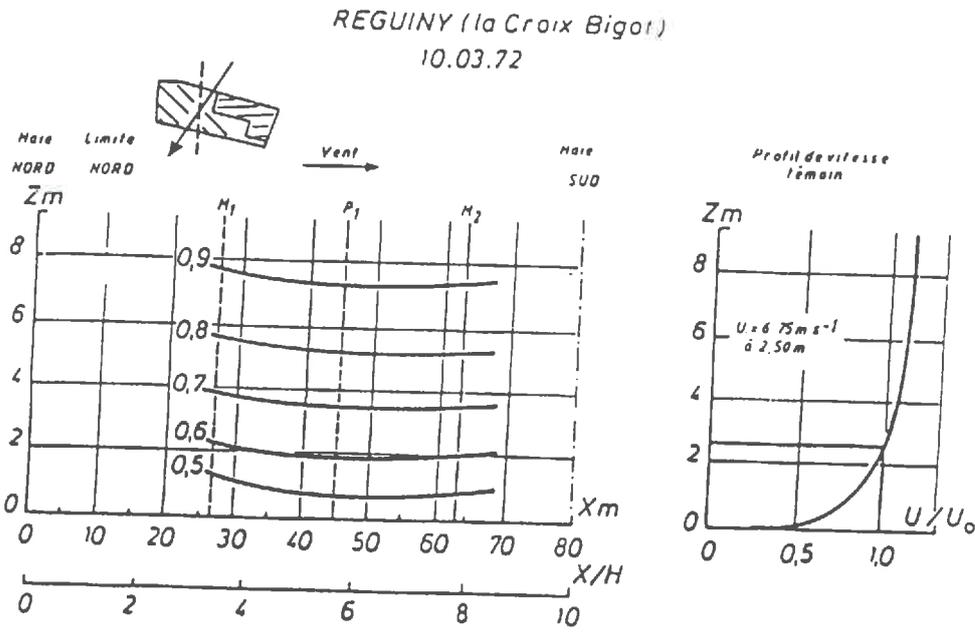


Figure 4.13

Résultats des mesures anémométriques effectuées dans la parcelle de Régigny le 10 mars 1972, avec un vent du Nord - Nord-Est alors que les arbres sont effeuillés. Les courbes isovitesses sont exprimées par rapport à la vitesse mesurée dans la zone ouverte à 2,50 m du sol.

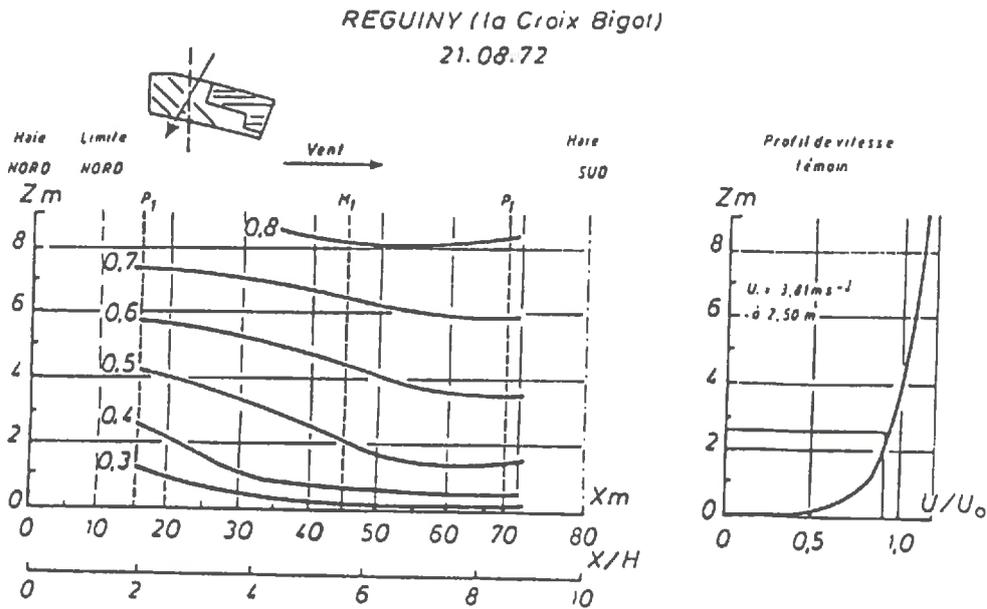


Figure 4.14.

Résultats des mesures anémométriques effectuées dans la parcelle de Régigny le 21 août 1972, avec un vent de même direction que le 10 mars 1972, et une disposition des appareils de mesures identiques, mais avec des arbres feuillus.

- Un effet local de la haie qui se manifeste sur une distance relativement courte par suite de l'augmentation de la turbulence due aux haies situées en amont (paragraphe 4.1.3.),

- Un effet régional qui a, pour effet, une réduction générale de la vitesse du vent sur toute la parcelle. Ceci se traduit, dans de très grandes parcelles, par des vitesses de vent inférieures à celle de la zone ouverte même en des points très éloignés de la haie qui entoure la parcelle.

c. Les profils verticaux de vitesse du vent

Des mesures complémentaires à celles destinées à cartographier les champs de vent dans une parcelle ont été effectuées de façon à essayer d'analyser l'influence de l'aménagement sur la vitesse du vent et de caractériser d'un point de vue aérodynamique les différentes zones décrites sur la figure 4.15. Des pylones de 20 et 28 m de haut ont été placés au centre de parcelles bocagères et en zone ouverte de façon à comparer, au même instant, les profils verticaux dans les deux situations. Les résultats expérimentaux (figure 4.16.) mettent en évidence deux types de profils : en zone ouverte le profil vertical est logarithmique, les points expérimentaux s'alignent sur une droite dont l'ordonnée à l'origine détermine un paramètre de rugosité Z_0 qui caractérise l'état de la surface (prairie rase dans l'exemple présenté). Dans la zone bocagère, on distingue un alignement des points selon deux zones bien distinctes, le niveau inférieur correspond au développement de la couche limite à l'échelle parcellaire avec un paramètre de rugosité identique à celui observé en zone ouverte, le haut du profil correspond à la zone de sillage du brise-vent et au début de la couche limite régionale.

Il n'a pas été possible de déterminer les paramètres de rugosité correspondant au développement de la couche limite régionale et ainsi d'établir une liaison simple entre paramètre de rugosité régional et aménagement.

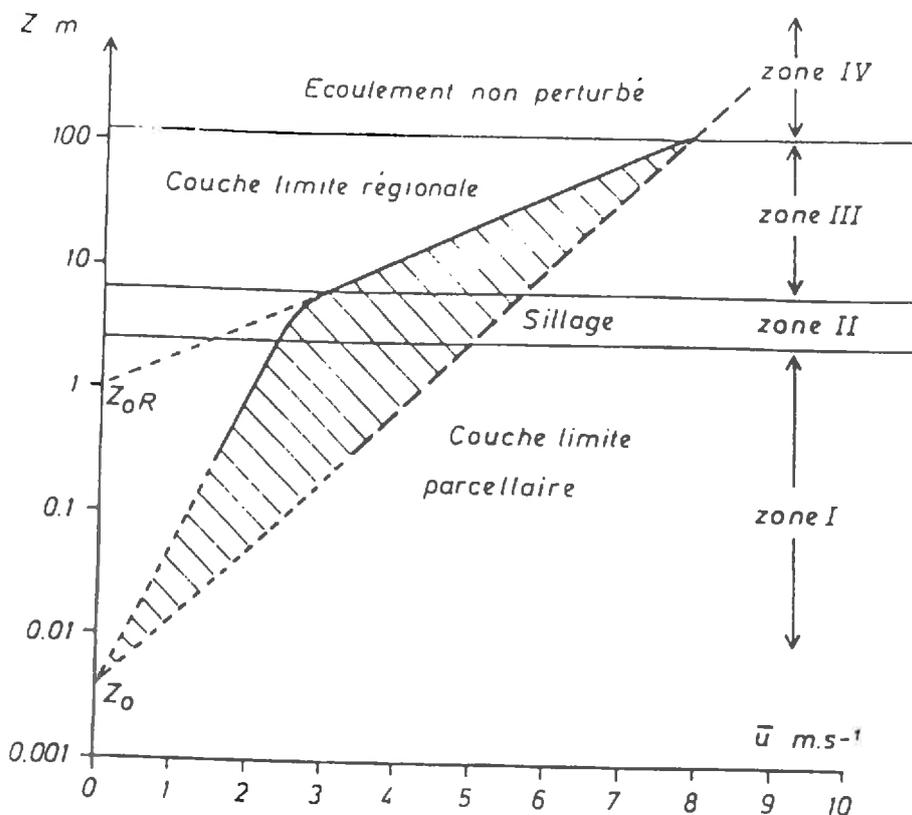


Figure 4.15.
Représentation schématique des profils de vitesse dans une zone dégagée et une zone cloisonnée (d'après GUYOT, 1972)

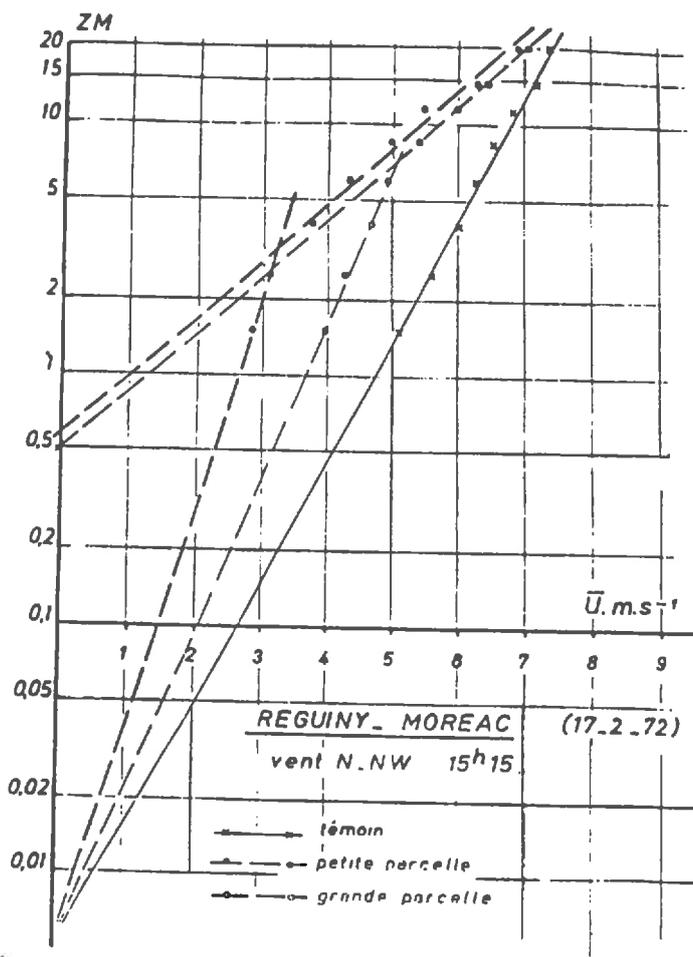


Figure 4.16.
Exemple de profils verticaux de vitesse mesurés dans une zone dégagée (MOREAC) et dans deux parcelles bocagères (REGUINY)

L'exploration de la vitesse du vent se faisait à un niveau insuffisamment élevé pour atteindre la couche limite régionale et de plus, la haie située à l'amont du pylone était trop haute par rapport au pylone qui se trouvait ainsi placé dans le sillage de la haie.

Ces profils aérodynamiques mettent toutefois en évidence la réduction des échanges d'énergie mécanique à l'intérieur du bocage au voisinage de la surface du sol, les échanges sont, par contre, accrus à partir d'une altitude proche de celle du sommet des haies. C'est la modification de ces échanges d'énergie mécanique qui sont à l'origine des modifications importantes dans la répartition des températures au voisinage du sol.

d. Influence de la topographie sur l'écoulement de l'air dans une zone bocagère

Des essais ont été entrepris pour mettre en évidence l'influence de la pente du terrain sur la vitesse du vent. Les mesures ont été effectuées dans la vallée de l'Evel dans la région nord du Morbihan. Dans cette région de bocage, les mouvements de relief sont peu accentués. Leur amplitude est de l'ordre de 50 m, les pentes sont assez faibles (environ 5 %). Les mesures ont été faites avec deux pylones de 20 m équipés de 8 anémomètres chacun et placés à 150 m l'un de l'autre selon la ligne de pente du versant de la vallée exposé face aux vents dominants (vent de secteur ouest).

La dénivellation entre les deux pieds des pylones était de 12 m, la pente sur laquelle était situé le dispositif expérimental était donc forte pour la région (8 %).

- Mesures effectuées avec un vent se dirigeant dans le sens de la pente

Il a été possible à partir de mesures effectuées sur les deux pylones de tracer des lignes d'isovitesse. Il existe lorsque le vent se dirige dans le sens de la pente une réduction de la vitesse à tous les niveaux au bas de la pente (figure 4.17.). La réduction de la vitesse du vent peut s'expliquer par une augmentation de la section de passage du vent au voisinage du sol. On remarque que l'écoulement suit bien la forme du terrain à proximité du sol, les lignes de courant se dissociant surtout dans la zone intermédiaire.

- Mesures effectuées avec un vent se dirigeant face à la pente

Les isotaques ont été tracées pour un vent se dirigeant face à la pente (figure 4.18.). On observe des lignes de courant ayant tendance à plonger vers le sol, il y a un resserrement des isotaques au sommet de la pente, la section de passage de l'air diminue et la vitesse du vent augmente.

Ainsi, les résultats expérimentaux montrent que lorsque le vent se dirige dans le sens d'une pente, il se ralentit, lorsqu'il se dirige face à la pente, il s'accélère.

e. Influence de l'environnement sur l'écoulement de l'air dans une parcelle bocagère

La comparaison des champs de vitesse de vent derrière un brise vent isolé et dans une parcelle bocagère (figure 4.19.) met en évidence une similitude de forme de courbes de réduction de vitesses qui dans les diverses situations se rabattent vers 7 à 8 fois la hauteur de la haie. On note, cependant, une différence dans l'extension de la zone protégée. Ainsi, le brise-vent isolé réduit

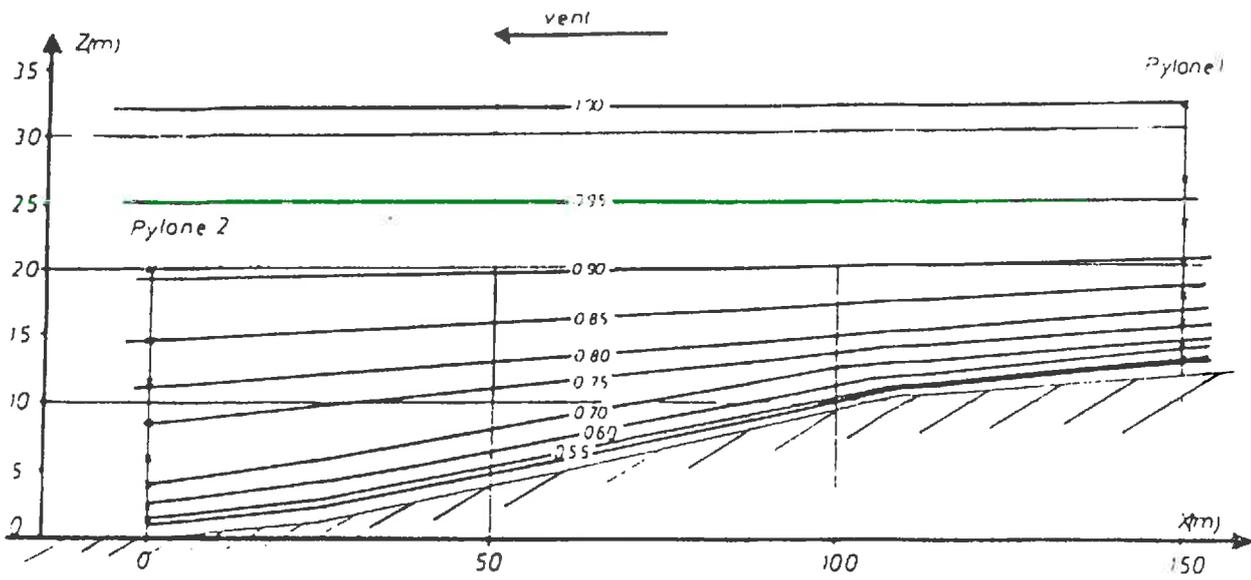


Figure 4.17.
Isothermes pour un vent se dirigeant dans le sens de la pente.

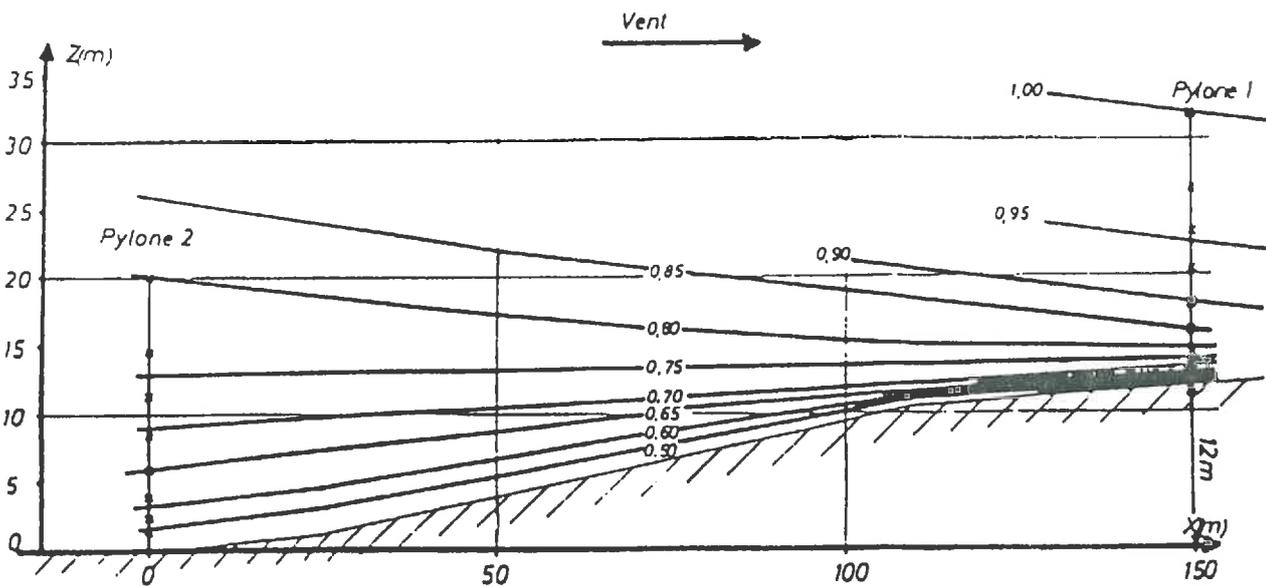


Figure 4.18.
Isothermes pour un vent se dirigeant face à la pente.

d'au moins 20 % la vitesse du vent mesurée à un niveau égal à la moitié de la hauteur du brise vent sur une distance qui n'excède pas 12 à 15 fois la hauteur du brise-vent, par contre, dans le bocage, la zone de protection peut être supérieure à 25 fois la hauteur de la haie. Tout se passe comme si la vitesse du vent qui atteint la haie de la parcelle bocagère était déjà réduite de 30 % par rapport à la vitesse mesurée en zone ouverte. La forme de la courbe de réduction du vent est analogue dans les deux situations mais la courbe de réduction du vent dans le bocage est décalée d'environ 30 % vers le bas. Cette protection accrue ne peut être due qu'à l'effet global des autres brise-vent qui se trouvent en amont de la parcelle.

Ces résultats sont confirmés par les expériences réalisées à Sarzeau par vent d'est (figure 4.20.). L'effet local de la haie a pratiquement disparu au-delà de 10 fois la hauteur de la haie, l'écoulement est ensuite régulier mais la vitesse du vent reste toujours inférieure à celle mesurée en zone ouverte à 2 m du sol, on observe une réduction de la vitesse du vent de 25 à 30 % sur toute l'étendue de la parcelle et à des distances supérieures à 45 fois la hauteur de la haie. A l'échelle de la parcelle, la réduction de la vitesse du vent est donc due à la superposition de deux effets, celui de la haie qui entoure la parcelle et celui de l'aménagement de la zone où se trouve la parcelle.

4.3.3. Les effets des brise-vent sur la température de l'air

Les effets des haies sur le microclimat thermique d'une parcelle sont très complexes, ils dépendent des échanges énergétiques et turbulents et de la distance aux brise-vent (Van EIMERN et al., 1964 ; GUYOT, SEGUIN, 1978). Nous avons abordé des effets thermiques à l'échelle de la journée à partir de résultats expérimentaux relatifs à des transects horizontaux et de profils verticaux mesurés dans des parcelles entourées de brise-vent et dans la vallée du Rhône et dans le bocage breton.

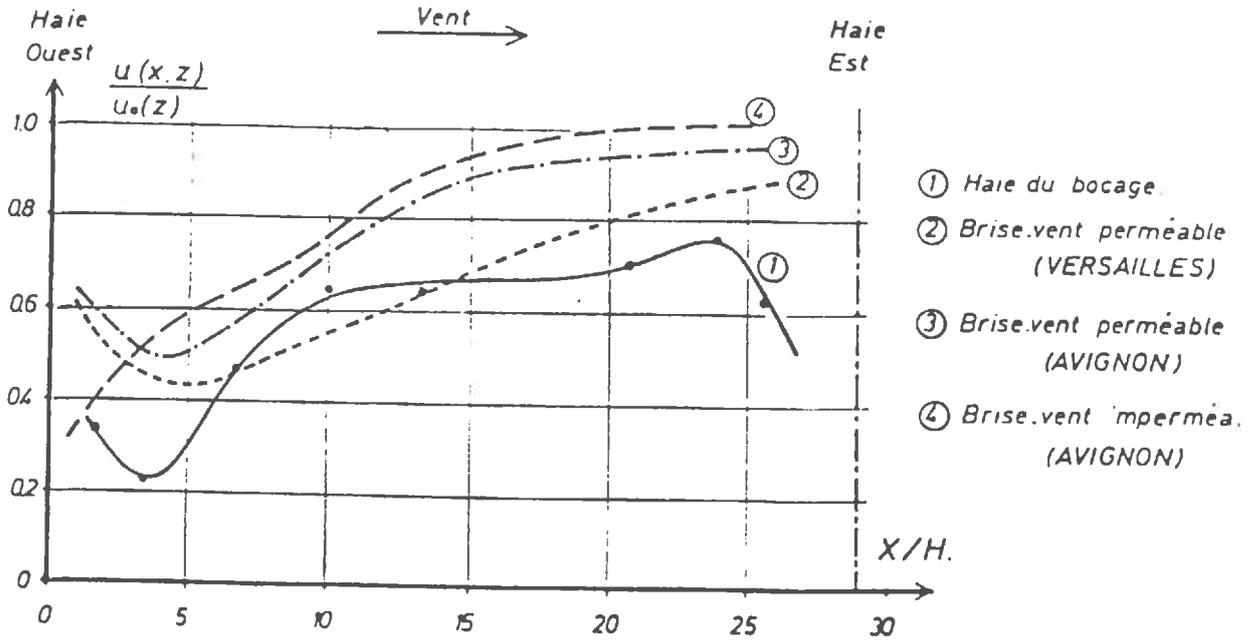


Figure 4.19.

Courbes représentant l'évolution de la vitesse relative du vent, à l'aval de différents brise vent. La vitesse de référence $u_0(z)$ est celle qui est mesurée en zone dégagée au même niveau. Courbe 1 : haie du bocage à Sarzeau (hauteur 6 m, niveau de mesure 2,50 m). Courbes 2, 3 et 4 : brise-vent isolés (hauteur 2 m, niveau de mesure 1 m) de différentes caractéristiques, placés dans un écoulement peu turbulent (Versailles, La Minière) et très turbulent (Avignon)

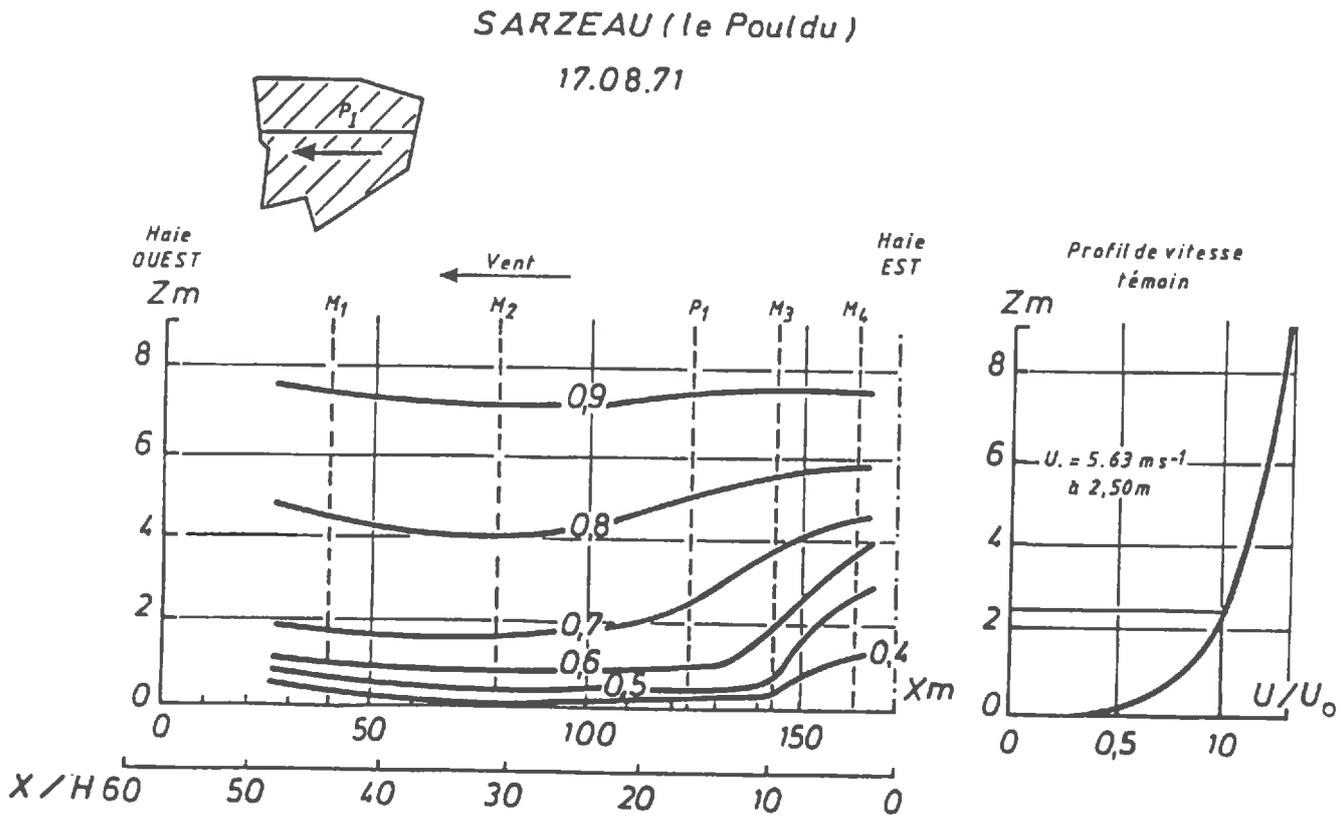


Figure 4.20.

Résultats des mesures anémométriques effectuées à Sarzeau avec un vent d'Est. Les traits verticaux indiquent les emplacements de mâts et pylônes de mesures (M, M₂, P₁...). La partie droite de la figure représente le profil vertical de vitesse réduit en zone dégagée, le niveau 2,5 m ayant été choisi comme référence.

a. Analyse des transects thermiques à l'intérieur de parcelles entourées de brise vent dans la Basse Vallée du Rhône

Les mesures ont été effectuées dans la vallée du Rhône sur le dispositif expérimental décrit précédemment. Les capteurs étaient disposés dans les deux parcelles selon un axe nord-sud perpendiculaire aux haies et à 1 m du sol.

L'analyse est faite à partir de l'évolution horaire des écarts entre les températures moyennes horaires mesurées à différentes distances de la haie et la température moyenne horaire mesurée au même instant en référence à l'amont de la parcelle nord pour une journée de ciel clair et de vent fort (mistral). Les variations de températures sont, au cours de la journée, semblables dans les deux parcelles, seuls les points situés à une fois la hauteur des haies se différencient pendant la phase diurne (figure 4.21.).

Il est possible de distinguer schématiquement trois zones d'influence thermique de la haie :

- La zone 0 - 1 H directement influencée par l'écoulement de l'air à travers la haie,
- La zone 1 - 5 H où les effets thermiques de la haie sont les plus importants,
- La zone 5 - 10 H faiblement influencée par la haie.

Dans la zone 0 - 1 H, les écarts de température sont faibles tout au long de la journée. Dans cette zone, deux phénomènes s'opposent : les apports radiatifs de la haie et l'advection intense due à la perméabilité de la base de la haie. Il se produit à ce niveau un écoulement préférentiel de l'air qui augmente les échanges turbulents. Ces mécanismes se traduisent par un léger abaissement des températures de l'air pendant la période diurne ($\Delta T \approx 0,5^\circ \text{C}$). Cette zone est donc plus directement influencée par des phénomènes advectifs.

Vent
→

le 18.8.75 Journée ciel clair, mistral

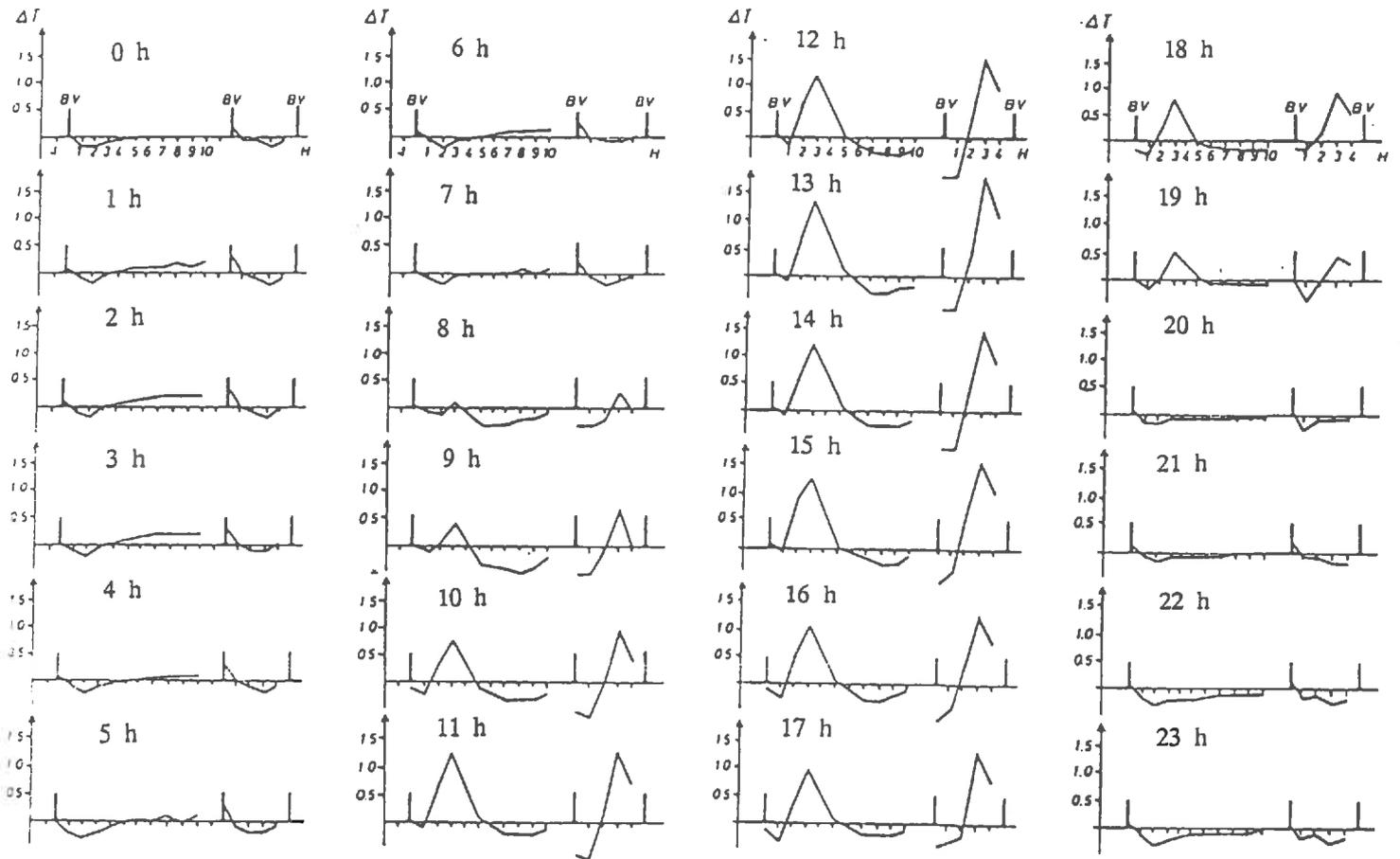


Figure 4.21.

Evolution horaire des écarts entre la température de l'air mesurée à 1 m du sol en témoin et à différentes distances des brise vent au cours d'une journée de ciel clair avec mistral

La zone 1 - 5 H est caractérisée par des écarts thermiques importants. Ceux-ci dépendent de l'heure de la journée. Les écarts sont d'autant plus accentués que l'énergie radiative est importante. Les températures sont plus élevées durant le jour (ΔT maxi 2° C) et légèrement plus basses la nuit (ΔT maxi $0,5^{\circ}$ C).

Cette zone correspond à la zone de réduction maximale de la vitesse du vent. Elle est caractérisée par la réduction des échanges entre les basses couches de l'atmosphère et celles des niveaux plus élevés. Il se produit alors une stagnation relative de l'air qui s'échauffe de façon plus intense au contact du sol le jour et qui se refroidit plus fortement la nuit. Cette augmentation de l'amplitude thermique journalière dans la zone 1 - 5 H est une modification microclimatique importante créée par la haie.

La zone 5 - 11 H est caractérisée par de faibles modifications de la température de l'air. On observe cependant une diminution de l'amplitude thermique journalière qui peut s'expliquer par le rabattement vers le sol de l'écoulement de l'air froid soulevé par le brise-vent et par une reprise de la vitesse du vent. Il se crée dans cette zone un brassage de l'air qui provoque une diminution de la température pendant la phase diurne et une augmentation pendant la phase nocturne.

Il existe une bonne relation entre les variations de la vitesse du vent en fonction de la distance à la haie et l'importance des écarts thermiques. En particulier, la zone (1-5H) où l'amplitude thermique journalière est nettement accentuée par le brise-vent correspond à la zone de la réduction maximale de la vitesse du vent. Les écarts thermiques sont réduits au delà de 5H où l'écoulement de l'air est caractérisé par la reprise de la vitesse du vent.

Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance des phénomènes radiatifs et convectifs sur l'amplitude des écarts thermiques. Le poids du rayonnement dans ces mécanismes est confirmé par les résultats obtenus lors d'une journée de temps variable (figure 4.22.). On remarque, alors, une

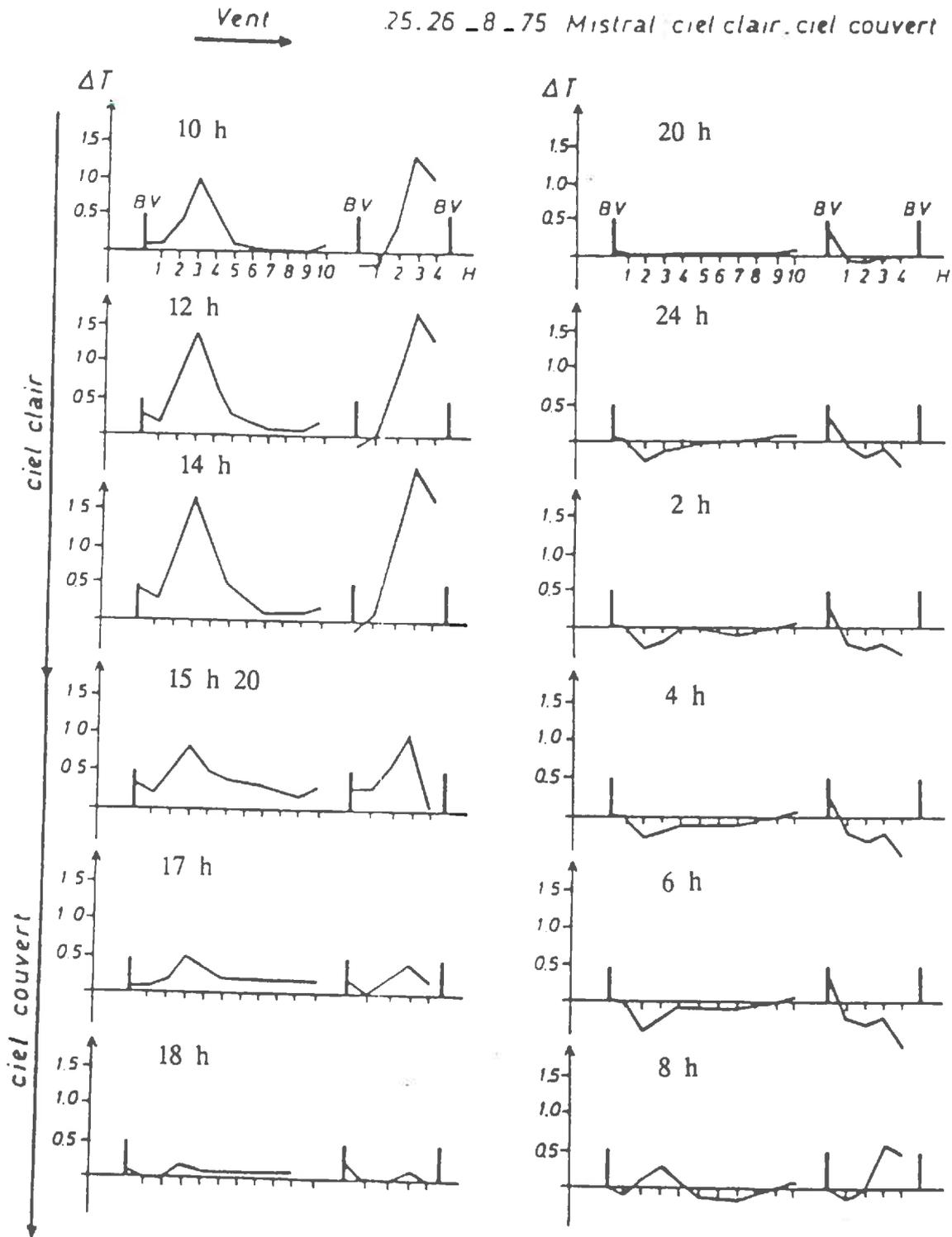


Figure 4.22.

Evolution horaire des écarts entre la température de l'air mesurée à 1 m du sol en témoin et à différentes distances des brise vent au cours d'une journée de temps variable

atténuation rapide des gradients de température dès l'apparition de nuages. Les écarts de température sont, par temps couvert, sur l'ensemble de la parcelle inférieurs à $0,5^{\circ}\text{C}$.

Les brise-vent créent donc une succession de microclimats dont les caractéristiques thermiques sont très différents selon la distance à la haie. Cette hétérogénéité des températures crée un milieu favorable à l'adaptation d'une plus grande variété d'espèces animales ou végétales

b. Les profils verticaux de température en zone bocagère et en zone ouverte

L'influence d'une haie sur les variations verticales des températures de l'air a été analysée à partir des profils verticaux obtenus simultanément au centre d'une parcelle bocagère (REGUINY) et en zone ouverte (MOREAC) au cours d'une journée de beau temps l'été (figure 4.23.).

En période diurne, les températures décroissent généralement lorsque l'on s'élève au-dessus du sol. C'est ce que l'on a observé aussi bien dans le bocage qu'en zone ouverte. L'écart entre le niveau 14,3 m et le niveau 1,3 m est, dans les deux situations, inférieur à 1°C . Autour du midi solaire, les profils sont pratiquement parallèles, les températures de la zone ouverte sont plus basses d'environ $1,5^{\circ}\text{C}$ que celles observées dans le bocage.

En fin d'après-midi, les profils se rejoignent progressivement à partir du moment où le bilan énergétique s'inverse (17 h).

En période nocturne, les écarts de températures entre les 2 sites sont faibles ($0,5^{\circ}\text{C}$) quelque soit le niveau considéré. Il se produit une inversion du sens des écarts, les températures de la parcelle bocagère sont alors plus basses que celles de la zone ouverte. Les gradients verticaux sont légèrement plus accentués dans la zone bocagère que dans la zone ouverte (réduction des échanges turbulents).

Les réductions des échanges entre les basses couches de l'atmosphère et les couches des niveaux les plus élevés se traduit donc dans la zone bocagère par une augmentation de l'amplitude thermique journalière sur l'ensemble du volume

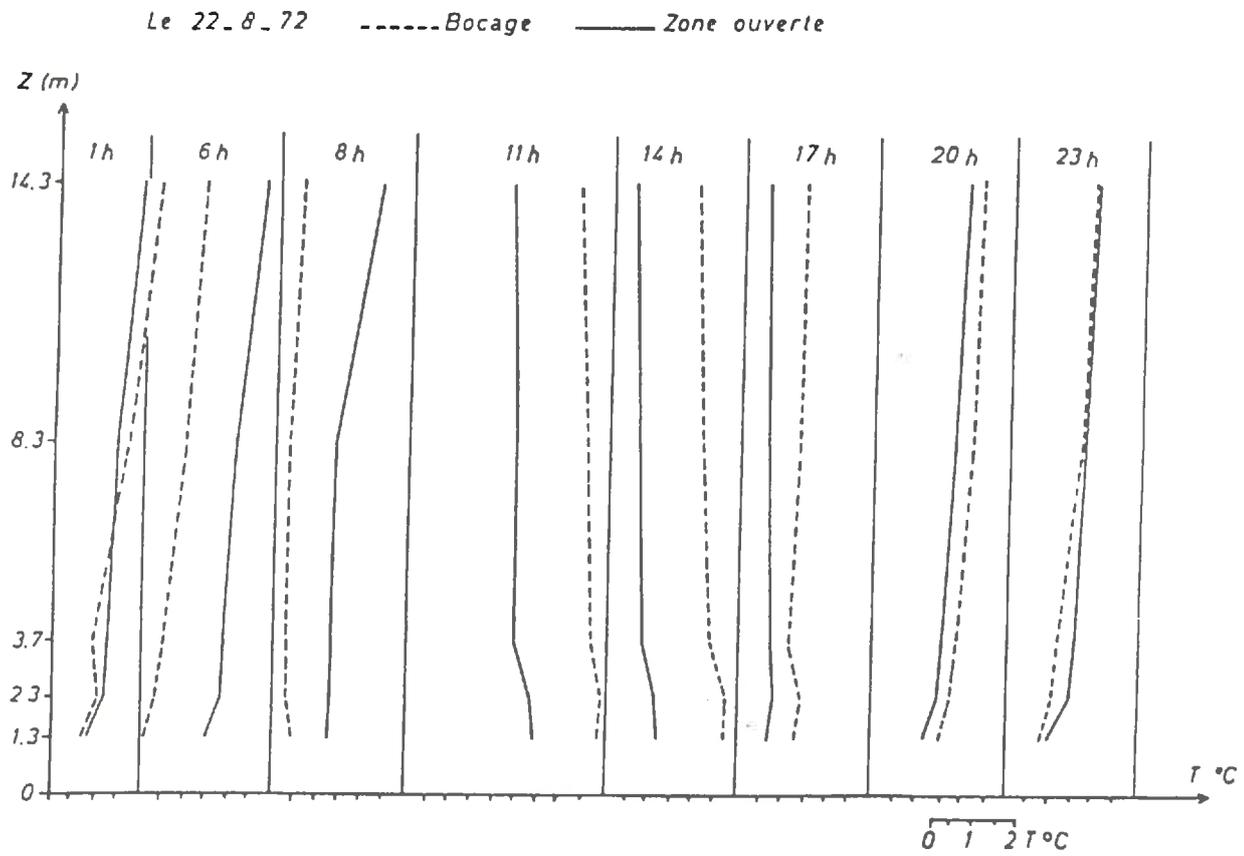


Figure 4.23.

Evolution des profils verticaux de température dans le bocage (REGUINY) et en zone ouverte (MOREAC)

compris entre les haies. Le climat bocager est donc un climat plus "continental" que le climat de la zone ouverte.

c. Cartographie thermique d'une parcelle bocagère

Les courbes isothermes tracées à partir des écarts entre la température mesurée à 2,20 m du sol en zone dégagée et les températures mesurées simultanément dans la parcelle permettent de visualiser la stratification thermique à l'intérieur des parcelles. Les figures 4.24. et 4.25. montrent les résultats obtenus en phase diurne et en phase nocturne dans une parcelle bocagère.

Pendant la phase diurne, les isothermes mettent en évidence une zone de réchauffement maximal de l'air située à une distance de la haie égale à 2 fois sa hauteur. Cette zone est aussi celle de la réduction maximale de la vitesse du vent (paragraphe 2.2.1.). Les isothermes s'orientent ensuite progressivement vers le sol jusqu'à 7 à 8 fois la hauteur de la haie. Ce phénomène peut s'expliquer par le rabattement de l'écoulement de l'air froid qui provient des couches supérieures et qui a contourné la haie. On observe également pendant la phase diurne la pénétration de l'air froid par la base très perméable de la haie. Le réseau des isothermes fait apparaître des gradients de l'ordre de 1,2° C dans la strate 0 - 4 m sur toute l'étendue de la parcelle.

Durant la phase nocturne, la stratification thermique est très régulière notamment au-delà de 3 fois la hauteur de la haie où les isothermes sont pratiquement horizontales.

Les températures les plus basses sont observées dans la zone qui correspond au minimum de vitesse du vent (à environ 2 à 3 fois la hauteur de la haie).

Les isothermes mettent également en évidence l'influence de la couronne des arbres sur le bilan radiatif. Le jour, on observe une légère augmentation de la température à proximité de la couronne. Au contraire, la nuit, le bilan radiatif provoque un abaissement des températures au voisinage de la couronne.

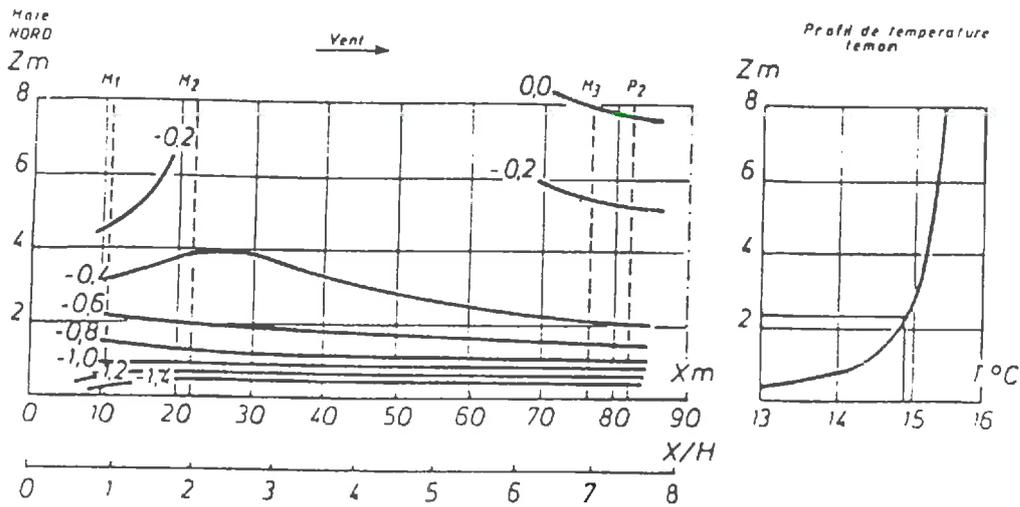


Figure 4.24.

Résultats des mesures de températures effectuées à Réguiny le 8 juillet 1973, en phase diurne, avec un vent de Nord-Est. Les isothermes sont exprimés en écart par rapport à la température mesurée en zone ouverte à 2.20 m du sol.

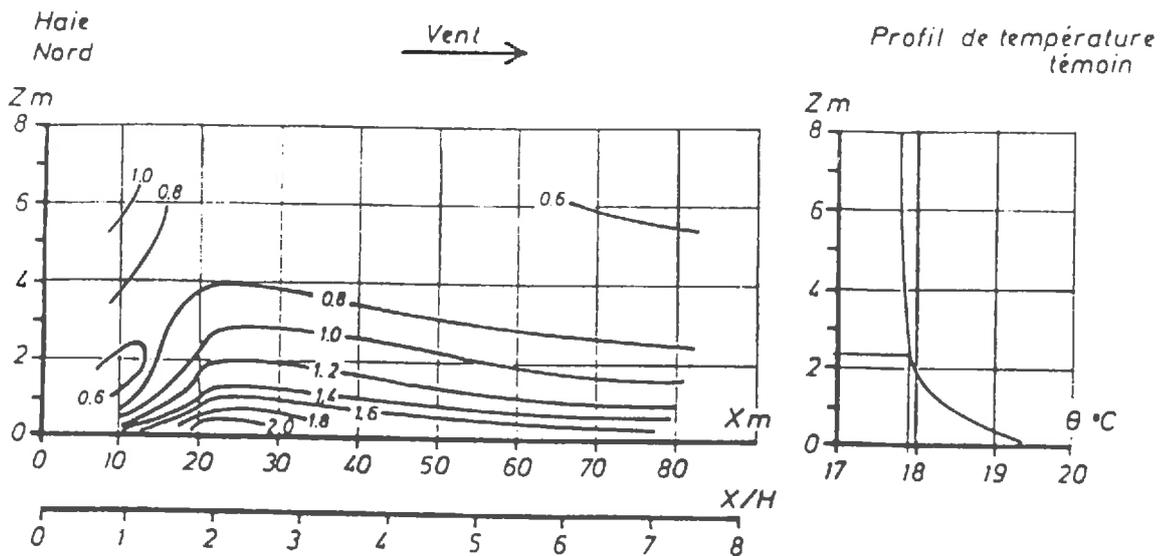


Figure 4.25.

Résultats des mesures de températures effectuées à Réguiny le 10 juillet 1973, en phase nocturne, avec un vent de Nord-Est. Les isothermes sont exprimés en écart par rapport à la température mesurée en zone ouverte à 2,20 m du sol.

Ainsi les mesures microclimatiques ont mis en évidence une grande **variabilité des températures de l'air à l'intérieur des parcelles bordées de brise-vent** aussi bien dans le Sud-Est de la France que dans le bocage de l'Ouest. Les résultats sont semblables dans les deux situations géographiques, la haie crée une succession de microclimats thermiques dont les caractéristiques sont essentiellement fonction de la distance de la haie. L'augmentation de l'amplitude thermique journalière dans une zone qui s'étend jusqu'à 5 fois la hauteur de la haie est la modification thermique la plus significative de la présence de brise-vent.

4.3.4. Les effets brise vent sur l'humidité de l'air

Les variations spatiales de l'humidité de l'air dépendent du flux de vapeur d'eau émis par le couvert végétal et de la vitesse avec laquelle celle-ci est évacué par les mouvements turbulents ou convectifs de l'air. La structure bocagère en réduisant les échanges de masse doit donc théoriquement augmenter la tension de vapeur d'eau. Par ailleurs, la haie peut selon les conditions météorologiques être un obstacle à l'advection d'air sec ou humide. Les résultats présentés sont relatifs à une journée de beau temps, une journée avec advection d'air humide et une journée avec advection d'air sec.

a. Les profils verticaux d'humidité de l'air

L'évolution horaire des profils verticaux de l'humidité de l'air a été déterminée à l'aide de psychromètres ventilés placés sur deux mâts l'un au centre d'une parcelle bocagère (REGUINY), l'autre en zone ouverte (MOREAC). Ces profils (figure 4.26.) montrent que les gradients verticaux de tension de vapeur sont très faibles dans les sites bocagers et en zone ouverte quelle que soit l'heure de la journée et le niveau considéré (les gradients n'excèdent pas 1 mb).

17.18_7_73

----- Bocage

—— Zone ouverte

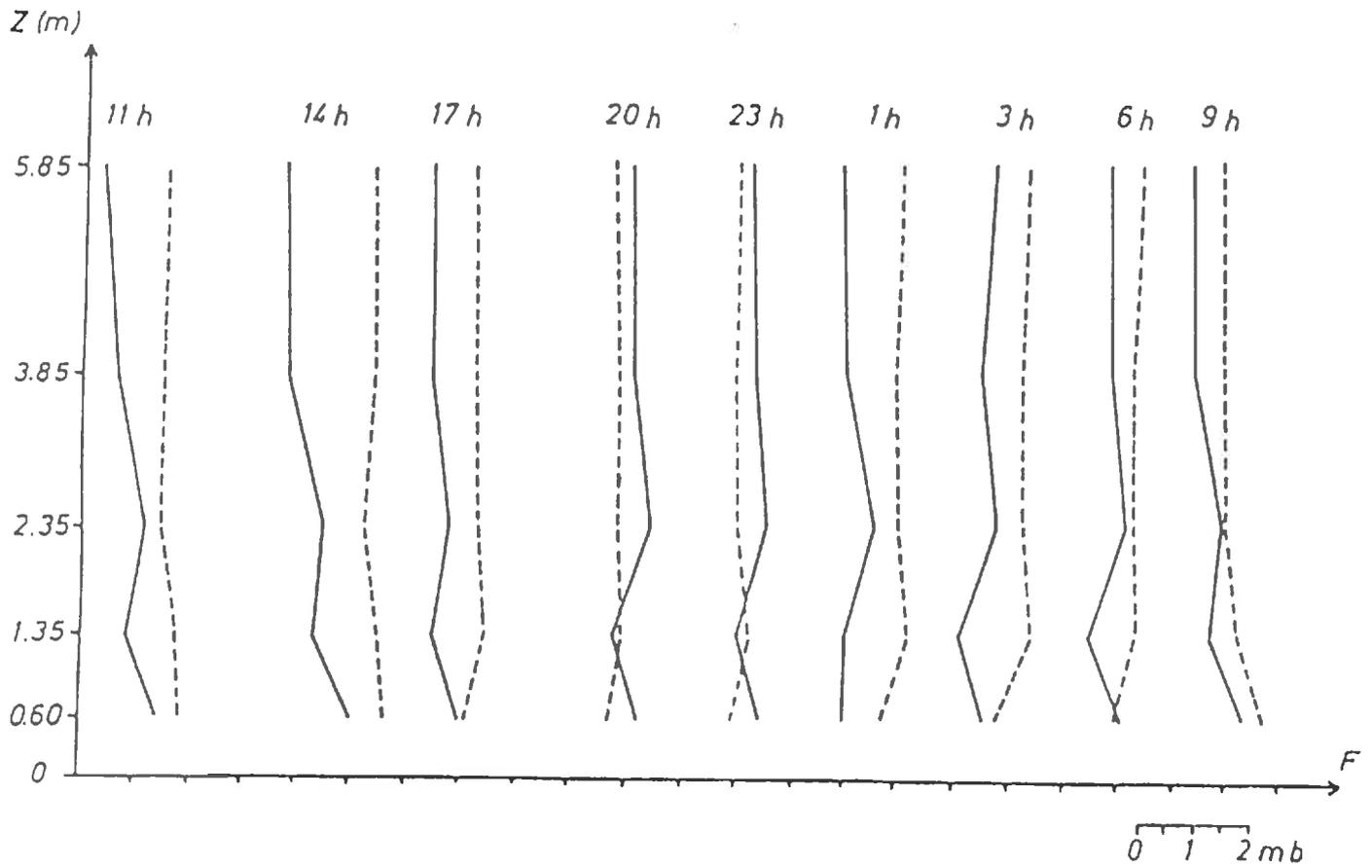


Figure 4.26.

Evolution des profils verticaux de tension de vapeur dans le bocage (REGUINY) et en zone ouverte (MOREAC).

La tension de vapeur est, pendant toute la partie diurne et une bonne partie de la nuit, inférieure en zone ouverte. Seuls les profils mesurés entre 20 heures et 23 heures font apparaître une tension de vapeur légèrement supérieure en zone ouverte. Ces résultats sont en accord avec l'hypothèse de réduction par les haies des échanges entre le sol et l'atmosphère.

b. Cartographie de l'humidité à l'échelle de la parcelle

L'influence d'une haie lors de situations d'advection est illustrée par les figures 4.27. et 4.28. où sont représentées les courbes d'isoécarts de tension de vapeur entre le bocage (REGUINY) et la zone dégagée (MOREAC) en fonction de l'altitude et de la distance de la haie. Lorsque l'on est en situation d'advection d'air sec, la haie a tendance à accroître le niveau de la tension de vapeur dans la parcelle bocagère.

Au contraire, par situation d'advection d'air humide, la haie a pour effet de réduire la tension de vapeur dans la parcelle sauf au voisinage du sol. Les haies créent en quelque sorte des alvéoles qui sont relativement isolées de l'écoulement général de l'air.

Il semble que le minimum de tension de vapeur coïncide assez bien avec le maximum de température (3 H), il est donc possible que le départ de la vapeur d'eau soit dû aux mouvements ascendants qui s'y produisent.

Ces études entreprises à l'échelle de la parcelle ont mis en évidence la complexité de l'effet des haies sur l'humidité de l'air. Leur action dépend, non seulement de la position du point considéré dans la parcelle mais également des conditions météorologiques.

4.4. CONCLUSIONS

Ainsi les études théoriques et les résultats expérimentaux ont permis de mettre en évidence les effets des haies sur les échanges turbulents et sur les échanges radiatifs.

REGUINY (La Croix Bigot)

11.7.73

de 10h.30 a 12h10

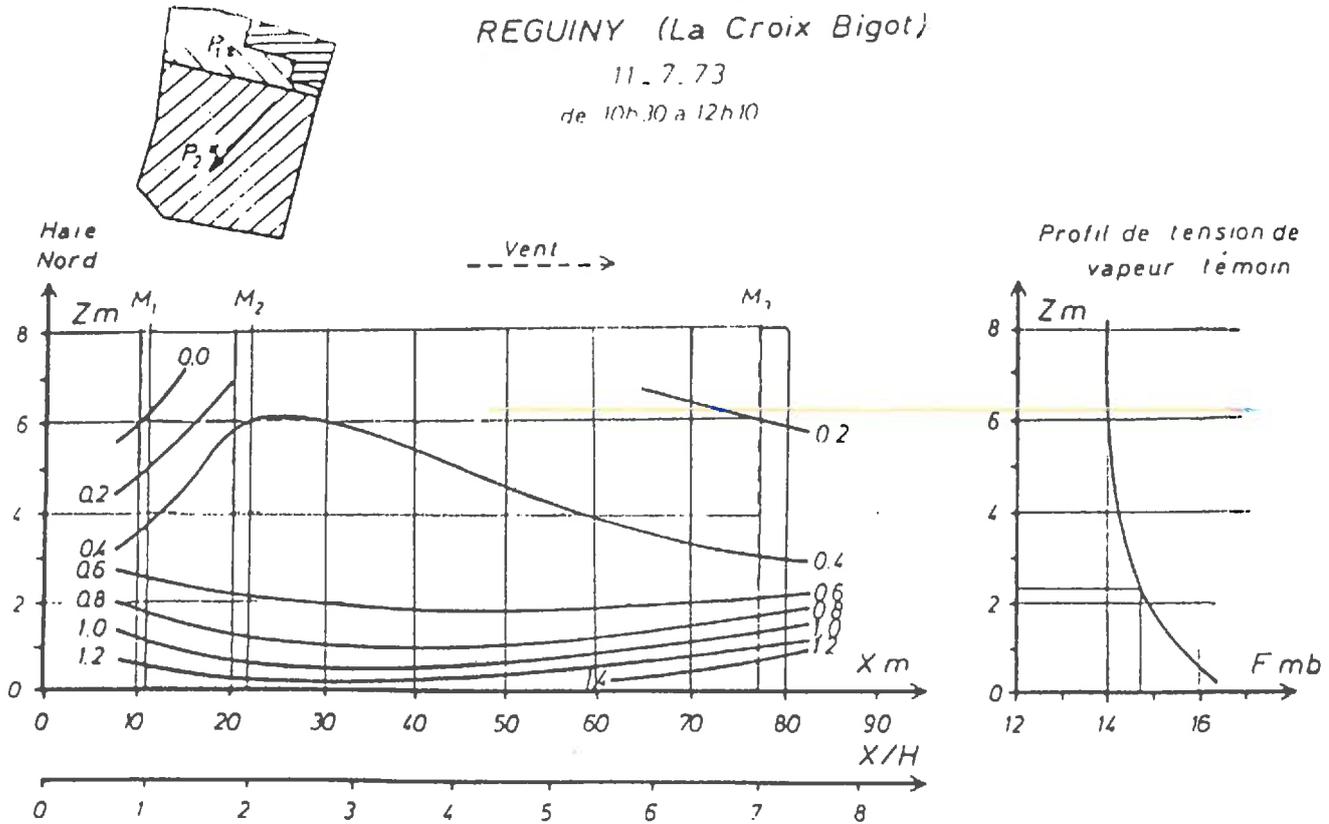


Figure 4.27.

Variation de l'écart de tension de vapeur entre le bocage et la zone dégagée en fonction de la distance à la haie et de l'altitude à Régigny lors d'une situation d'advection d'air sec.

La partie droite de la figure représente le profil vertical de tension de vapeur dans la zone dégagée. La partie gauche représente les courbes d'égal écart de tension de vapeur par rapport à la tension de vapeur mesurée à 2,20 m du sol en zone ouverte.

REGUINY (La Croix Bigot)

8.7.73

de 11h10 à 15h20

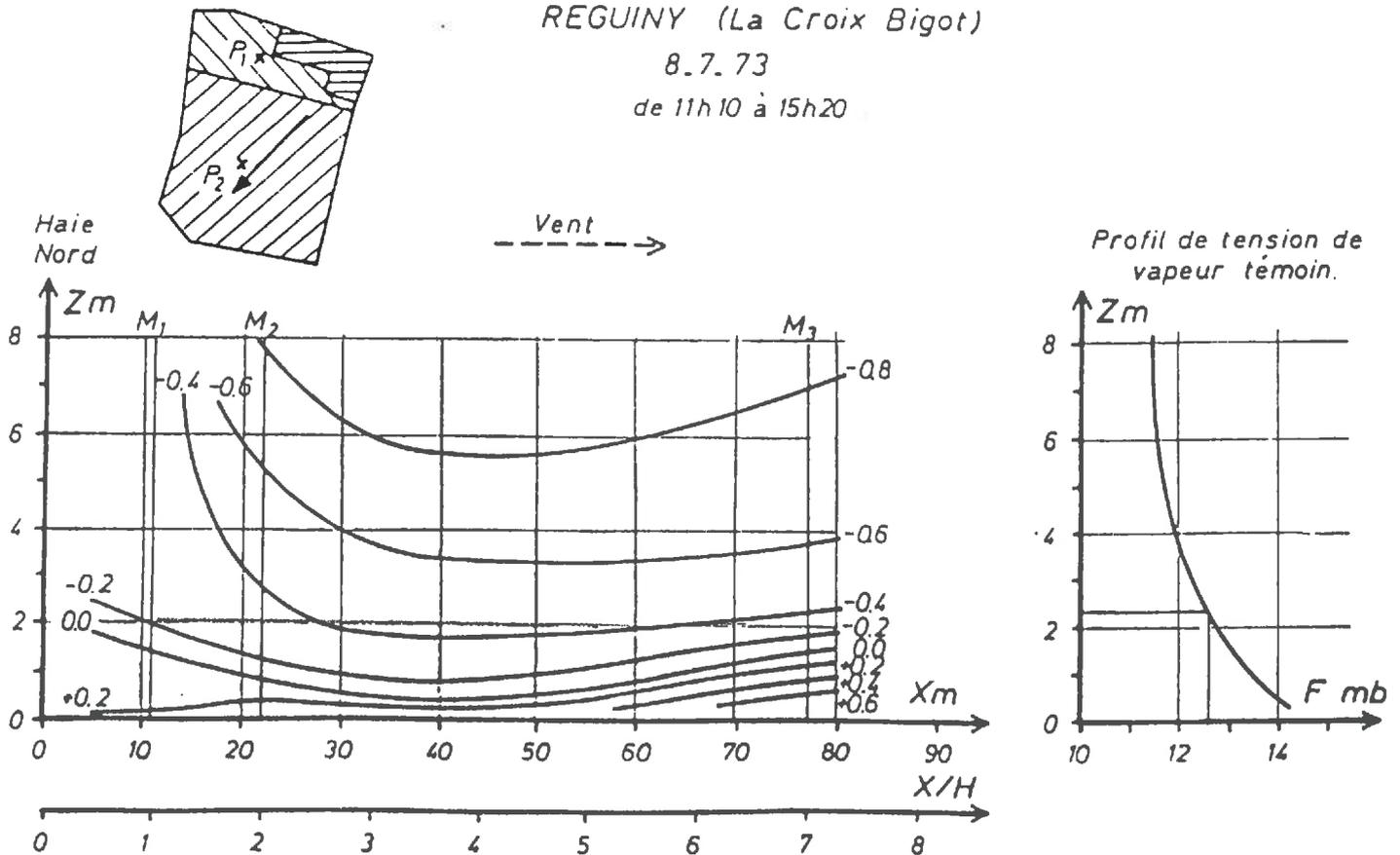


Figure 4.28.

Variation de l'écart de tension de vapeur entre le bocage et la zone dégagée en fonction de la distance à la haie de l'altitude à Régigny le 8 juillet 1973.

Au niveau de la parcelle, les études sur l'écoulement de l'air ont montré que l'action des haies qui bordent la parcelle était prépondérante par rapport à l'environnement régional. Il existe, cependant, en plus de ce facteur local de réduction de la vitesse du vent, un effet régional dû à l'aménagement des haies situées en amont et à la topographie.

Cet effet régional se traduit par une réduction de la vitesse du vent à 2,5 m du sol d'environ 20 à 30 % par rapport à une zone ouverte.

L'écoulement de l'air se rabat vers le sol généralement à une distance comprise entre 8 et 10 fois la hauteur de la haie située en amont. C'est ce rabattement qui va provoquer des modifications dans la répartition des températures de l'air mesurées au voisinage du sol. De même, les profils verticaux de vitesse du vent ont mis en évidence les effets des haies sur la réduction des échanges turbulents au voisinage du sol alors qu'ils sont accélérés à partir d'une altitude proche de celle du sommet des haies. Ce sont ces modifications des échanges turbulents qui provoquent la réduction des flux de chaleur et de vapeur d'eau à la surface du sol. Les haies agissent également sur la répartition de l'énergie absorbée par le système sol-plante dans une zone qui s'étend jusqu'à environ 4 fois la hauteur de la haie (rayonnement visible et infrarouge thermique). Les haies réduisent l'énergie solaire reçue du côté opposé au soleil (zone d'ombre qui atteint une fois la hauteur d'une haie est-ouest en été) au contraire, elles accroissent l'énergie reçue au sol par réflexion du rayonnement sur la face de la haie exposée au soleil. Les haies émettent également un rayonnement thermique qui accroît l'énergie reçue au sol jusqu'à environ 4 fois leur hauteur. Les haies agissent indirectement sur le bilan radiatif au-delà de cette distance en provoquant une modification de la température de surface du sol (élévation le jour, abaissement la nuit).

C'est la combinaison de ces modifications en fonction des caractéristiques de la haie (hauteur, espacement, orientation) de la date et de la latitude qui va définir le rôle de la haie sur le bilan radiatif.

Les études relatives aux effets des haies sur la température de l'air au niveau de la parcelle sont complexes, et dépendent notamment de la distance aux haies, du bilan radiatif et de la vitesse du vent. On peut cependant dire que globalement la réduction des transferts turbulents entre le sol et l'atmosphère se traduit par une élévation des températures maximales et un abaissement des températures minimales. Les écarts thermiques entre zone ouverte et parcelles abritées par des brise vent dépendent également des conditions météorologiques, ils sont d'autant plus accentués que le rayonnement solaire est important.

Les profils verticaux de températures ont montré que les haies du bocage accroissaient, en général, les gradients verticaux. Ceci est conforme avec la théorie de la réduction des échanges entre le sol et l'atmosphère.

Les effets des haies sur l'humidité de l'air se traduisent principalement, au cours de la journée, par une augmentation de la teneur en eau. Cette augmentation est due à la réduction des transferts verticaux de vapeur d'eau. Toutefois, en bordure de mer, le phénomène inverse peut être observé, les haies s'opposant à la pénétration de l'air humide d'origine marine.

CONCLUSIONS GENERALES

Les travaux que nous venons de présenter ont permis d'analyser la formation de microclimats de structures végétales arborescentes. Nous nous sommes successivement intéressés au microclimat de l'arbre isolé, à celui d'un peuplement d'arbres puis enfin à celui de l'environnement d'arbres plantés en ligne. A chacune de ces échelles d'espace, nous avons souligné l'importance des divers échanges d'énergie sur les relations entre le climat et les différentes structures arborescentes. La complémentarité des résultats ainsi obtenus permet de mieux comprendre les interactions des arbres avec le milieu dans lequel ils vivent.

Nous avons ainsi montré que la formation des microclimats, dont les caractéristiques sont souvent très différentes des conditions climatiques régionales, résultait des modifications des échanges d'énergie entre le sol et l'atmosphère par les structures arborescentes.

A l'échelle de l'arbre, l'analyse à l'aide du bilan d'énergie a permis de souligner le rôle des échanges radiatifs et de la vitesse du vent sur la température de surface du tronc ou sur la température de rameaux.

Nous avons montré qu'il existait, à un instant donné, des relations de type linéaire entre les écarts température de surface - température de l'air ($T_s - T_a$) d'une part et la vitesse du vent d'autre part.

L'analyse du bilan d'énergie a également permis d'expliquer les écarts de température de surface observés lorsqu'on modifie l'albédo d'un arbre par blanchiment. Des expressions analytiques ont été établies entre les écarts de température de surface de troncs peints et non peints, le rayonnement global et la vitesse du vent.

Ces travaux ont montré qu'il était difficile de caractériser la température d'un arbre à partir d'une mesure ponctuelle.

Il existe le long d'un tronc des gradients de température de surface très accentués qui dépendent, à un instant donné, de la hauteur au-dessus du sol et de l'orientation. Nous avons mis en évidence l'influence du rayonnement et du vent sur la variabilité des températures de rameaux dans un verger. Ces études ont permis de souligner la disparité entre les mesures de température de surface ou de la zone cambiale de certains organes végétaux et les mesures classiques utilisées en agrométéorologie.

Cet ensemble de résultats permet de mieux comprendre comment évolue la température d'un arbre. Ces résultats peuvent être utilisés dans toute étude de relation climat - arbre - parasites. C'est ainsi que le développement de maladies bactériennes des arbres fruitiers dépend, à la fois, des effets des conditions microclimatiques et de leur amplitude de variation, sur le végétal et sur le parasite. Des variations importantes de températures de surfaces de l'arbre entre le jour et la nuit, peuvent provoquer des fissures de l'écorce ou des lésions des tissus végétaux et ainsi créer des conditions favorables à l'implantation de la maladie. Le développement de la bactériose dépendant ensuite des conditions thermiques du substrat sur lequel se multiplient les parasites.

Les travaux présentés, outre l'originalité des résultats expérimentaux doivent permettre de mieux définir des méthodologies adaptées à l'analyse des conditions de développement des arbres fruitiers et à la limitation des attaques parasitaires.

Les études effectuées à l'intérieur de la cédraie ont permis d'analyser l'influence d'un groupe d'arbres (massif forestier) sur le microclimat. Les résultats sont relatifs à une essence récemment introduite en France et sur laquelle aucune étude microclimatique n'avait encore été entreprise.

Nous avons mis en évidence le rôle prépondérant de la strate supérieure du couvert forestier sur les échanges d'énergie. C'est ainsi que les profils verticaux de rayonnement et de vitesse du vent dans la cédraie sont caractérisés par de très forts gradients dans la strate supérieure du houppier et par des gradients très faibles dans les strates inférieures du couvert forestier. L'absorption du rayonnement solaire par le couvert dépend de la structure de la végétation mais aussi de la nature du rayonnement incident (direct, diffus). L'énergie solaire reçue au niveau du sol de la cédraie ne représente qu'une faible partie du rayonnement incident, l'atténuation du rayonnement est toutefois relativement plus importante pour un rayonnement diffus que pour un rayonnement direct.

De même, les variations verticales de la vitesse du vent sont très importantes (variations exponentielles) dans la strate supérieure du houppier, sous ce dernier, le profil de vent est quasi-uniforme.

La strate supérieure du couvert forestier se comporte donc comme la surface d'échange de l'énergie radiative et mécanique entre le couvert et l'atmosphère.

Ceci entraîne des conditions microclimatiques à l'intérieur de la cédraie différentes de celles que l'on trouve à l'extérieur.

Ainsi, contrairement à ce qui se passe en zone ouverte, les profils verticaux de températures et d'humidité de l'air sont caractérisés par de faibles gradients depuis le sommet jusqu'à la base du couvert quelle que soit l'heure de la journée. Le microclimat de l'ensemble de la cédraie est donc défini par une bonne homogénéité des températures et de l'humidité de l'air.

On note, cependant, que les gradients thermiques sont légèrement plus accentués dans une jeune cédraie (Luberon) que dans une cédraie plus âgée (Minervois). La densité de la biomasse forestière détermine le niveau de la surface d'échange d'énergie avec l'atmosphère. Lorsque la densité du couvert végétal est faible, le sol joue encore le rôle de surface d'échange, le sens de variation des flux n'est pas totalement modifié par rapport à ce que l'on trouve en zone ouverte. Le rôle d'écran du couvert forestier se traduit également, à l'échelle de la journée, par une absence de variation de la température de sol ce qui la différencie très nettement de la température du sol d'une zone ouverte.

Nous avons également mis en évidence l'importance du terme radiatif sur les écarts entre la température de surface de branches et celle de l'air mesurées sous couvert forestier. Seules les températures d'écorce exposée au rayonnement solaire direct sont significativement supérieures à celle de l'air. En l'absence de rayonnement solaire direct, les écarts ($T_s - T_a$) ne sont pas significatifs. Ces résultats sont très différents de ceux que nous avons observés sur un arbre effeuillé où, durant la période hivernale, les écarts entre la température de l'air et celle de l'écorce sont toujours significatifs. Ceci met en évidence l'importance du feuillage sur la température de surface de l'écorce.

Outre, leur apport sur la connaissance de la formation du microclimat à l'intérieur de la cédraie, les analyses présentées sont nécessaires à la compréhension du fonctionnement de l'écosystème forestier et des conditions de développement de la flore et de la faune qui lui sont associées. Des travaux en cours doivent notamment permettre de préciser l'impact des paramètres microclimatiques sur le cycle biologique d'insectes parasites comme la tordeuse du cèdre (*Epinotia cedricida* Diakonoff) dont on sait, par exemple, que l'activité est très dépendante de la répartition de la vitesse du vent dans la cédraie.

Dans cette contribution, nous nous sommes également efforcé de mettre en évidence le rôle des arbres, utilisés comme brise vent, sur le microclimat de leur environnement.

Les analyses théoriques et les résultats expérimentaux présentés ont surtout contribué à préciser le rôle des haies sur le bilan radiatif et sur l'hétérogénéité des microclimats à l'échelle de la parcelle. L'impact d'un aménagement régional sur la formation de microclimat dans une région bocagère a également été abordé.

Nous avons, en particulier, montré que les haies intervenaient comme un piège à rayonnement. Globalement, une zone cloisonnée par des brise vent capte légèrement plus d'énergie radiative qu'une zone ouverte. Le supplément d'énergie capté dans un bocage peut être évalué à 4 % pour un espacement de haies égal à 5 fois leur hauteur et à 2 % pour un espacement de 8 fois leur hauteur ce qui équivaut à un déplacement fictif en latitude respectivement de 300 km et 150 km vers le sud au niveau de la Bretagne (BOUCHET et al., 1976).

Ces résultats peuvent être généralisés à d'autres types de structures agricoles où les plantations d'arbres se font en lignes ainsi dans des vergers le gain d'énergie captée par piégeage du rayonnement pourra atteindre 11 %. Ce sont des données dont il faut tenir compte dans les études d'aménagement de l'espace rural ou lors d'implantation de vergers ou de vignobles par exemple.

Nous avons, par ailleurs, présenté les résultats expérimentaux qui permettent de préciser les conditions de la réduction de la vitesse du vent et des échanges turbulents dans des parcelles de bocage. Nous avons, en particulier, démontré que l'écoulement de l'air au niveau d'une parcelle résultait de la superposition d'un effet local de la haie qui entoure la parcelle et d'un effet régional dû à l'aménagement du bocage. Cette réduction due à l'effet régional a été évaluée à environ 30 % de la vitesse mesurée en zone ouverte. Ces résultats peuvent servir de base aux études d'aménagement dans les régions bocagères. Ainsi, la réduction de la vitesse du vent pourra subsister dans de très grandes parcelles de bocage à condition de maintenir à son pourtour un réseau plus dense de haies qui créeront une protection régionale au niveau des grandes parcelles.

Les profils verticaux mesurés à l'intérieur d'une parcelle entourée de brise-vent ont montré que les échanges turbulents étaient réduits au voisinage du sol et que par contre, l'accélération de la vitesse du vent au-dessus du brise-vent provoquait un accroissement des échanges d'énergie mécanique. Ce sont ces modifications des échanges turbulents qui vont orienter les variations des flux d'énergie et de masse au niveau de la parcelle.

Cette contribution a également permis de présenter une analyse fine de la variabilité spatiale de la température de l'air à l'échelle de la parcelle. Le suivi de l'évolution de l'amplitude thermique journalière au pas de temps horaire a permis de visualiser le rôle des échanges d'énergie mécanique et du bilan radiatif sur la température de l'air en fonction de la distance au brise-vent. Ceci a permis de montrer qu'il existait derrière un brise-vent une succession de microclimats thermiques qui se différencient du climat d'une zone ouverte essentiellement par un "continentalisme" accru.

De même, la réduction des échanges entre le sol et l'atmosphère se traduit généralement par une augmentation de la teneur en eau de l'air à l'intérieur d'une parcelle bocagère. Cependant, en bordure de mer, le bocage peut lors de situations d'advection en période sèche s'opposer à la pénétration d'air humide. Ici aussi, on observe un effet régional du bocage qui se superpose à l'effet local de la haie.

Ainsi, au climat uniforme d'une zone ouverte s'oppose un climat riche en microclimats d'une zone bocagère. La connaissance de ces variations des données climatiques dans l'espace est nécessaire à l'interprétation des relations entre un phénomène biologique et le climat. C'est ainsi que ces travaux sur les brise-vent ont servi de base aux zoologistes pour expliquer la pullulation et le développement de certains insectes parasites dans les régions bocagères de Bretagne ou dans les zones maraîchères de la basse vallée du Rhône. La répartition des insectes au niveau de la parcelle est très dépendante des effets aérodynamiques des brise-vent, le développement de virus transportés par ces insectes étant lui plus dépendant des conditions thermiques de la parcelle.

Cet ensemble de résultats expérimentaux complémentaires ont permis de souligner l'intérêt des mesures microclimatiques pour caractériser les échanges d'énergie entre des milieux agricoles hétérogènes et l'atmosphère. Les études agroclimatiques classiques sont généralement abordées à partir de données recueillies dans un poste météorologique en zone dégagée, nous avons montré dans ce mémoire que ces données ne pouvaient s'appliquer aux milieux caractérisés par la présence de structures arborescentes. Seules la prise en compte des différents gradients microclimatiques permet de mettre en évidence la grande variabilité des paramètres microclimatiques de ces milieux. Nous avons également montré que l'analyse précise de la formation des microclimats nécessite la connaissance des différents flux d'énergie mécanique ou radiative qui conditionnent la répartition spatiale et temporelle des paramètres physiques qui entrent en jeu.

L'hétérogénéité spatiotemporelle des facteurs climatiques de ces milieux agricoles a des conséquences dans différents domaines de fonctionnement des écosystèmes.

Les conséquences écologiques sont essentiellement liées aux modifications des échanges d'énergie entre le sol et l'atmosphère. Les arbres modifient les caractéristiques du climat régional (rayonnement global, vitesse du vent, température de surface, température de l'air...) en créant un milieu riche en microclimats. Ainsi la production agricole sera dans les régions bocagères plus directement affectée par un accroissement de l'énergie radiative recue au niveau des cultures et par l'augmentation de l'amplitude journalière des températures. De même, les couverts forestiers sont caractérisés par des niveaux de rayonnement global et de vitesse du vent très différents de ceux d'une zone ouverte, ces hétérogénéités microclimatiques créent des conditions de régénération et de croissance qui sont propres au couvert forestier.

Les conséquences écophysiological sont elles déterminées par les modifications des caractéristiques microclimatiques qui interviennent sur les conditions de croissance et de développement de la faune et de la flore. Ainsi dans les parcelles agricoles entourées de haies, l'augmentation de l'amplitude journalière des températures ainsi que la température moyenne plus élevée seront favorables à une amélioration de la précocité de la production agricole par contre l'abaissement des températures minimales augmentera les risques de gelées. De la même façon, les écarts entre les températures de surface des végétaux et la température de l'air seront dépendant du type de structure végétale, nous avons vu que si ces écarts sont importants dans des structures de type verger, ils sont très atténués à l'intérieur de couverts forestiers. Il est important en écophysiology de prendre en compte ces écarts qui vont influencer le développement et la croissance des végétaux. Par ailleurs la physiologie de plantes est souvent étudiée en liaison avec des "sommés de températures" calculée par rapport à différents seuils ; la somme de températures mesurées en zone dégagée sous abri météorologique ne pourra être représentative des différentes sommés de températures que l'on pourra trouver dans des milieux agricole hétérogènes, ces sommés de températures dépendant du type de structures et de l'emplacement choisi dans cette structure.

Il existe également des conséquences écopathologiques à ces modifications du climat régional ainsi, dans des structures caractérisées par des brise-vent, la répartition spatiale de certains parasites (pucerons, virus,..) dépend directement des modifications de l'écoulement de l'air par les brise-vent. Les insectes se comportent comme des particules inertes et leur déplacement est conditionné par l'écoulement du vent au niveau de la parcelle. De la même façon, l'épidémiologie de virus sera très dépendantes de la répartition des insectes lorsque ceux-ci sont vecteurs du virus. Dans les vergers, les conditions d'implantation de maladie vont dépendre des caractéristiques microclimatiques tant au niveau de la sensibilisation de l'arbre à la maladie, qu'au niveau de la multiplication des parasites sur l'arbre

(bactériose du pêcher). Ce sont également les conditions microclimatiques du couvert forestier qui vont influencer le cycle biologique et l'activité de certains parasites (tordeuse du cèdre).

Ainsi, les arbres introduisent une hétérogénéité verticale et horizontale des facteurs climatiques qui n'existe pas dans une zone plane et dégagée. Les interactions entre l'arbre, la haie, le couvert forestier et l'atmosphère conduisent à des modifications des échanges dans l'espace et dans le temps. Il est important, dans toute étude bioclimatologique, de prendre en compte ces modifications qui corrigent les valeurs des paramètres définissant le climat régional.

La connaissance des mécanismes qui entrent en jeu dans la formation de microclimats doit aider à mieux comprendre la biologie des plantes, de la faune et de la flore associées. Elles doivent permettre une meilleure conduite des cultures (traitement phytosanitaire, irrigation, gelée, taille...) et une meilleure orientation des interventions humaines dans les problèmes d'aménagement de l'espace rural ; c'est aussi la prise en compte de ces conditions microclimatiques qui devrait améliorer le développement d'une agriculture plus productive et/ou plus économe vis-à-vis des apports énergétiques extérieurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALEXANDRE D.Y., 1982

Pénétration de la lumière au niveau du sous-bois d'une forêt dense tropicale. Ann. Sci. Forest. 39(4) : 419 – 438.

AUSSENAC G., 1975

Couverts forestiers et facteurs du climat : leurs interactions conséquences écophysologiques chez quelques résineux. Thèse Doctorat d'Etat. Nancy, 234 p.

AUSSENAC G., DUCREY M., 1977

Etude bioclimatologique d'une futaie feuillue (Fagus silvatica et Quercus sessiliflora Saliab.) de l'Est de la France. I. Analyse des profils microclimatiques et des caractéristiques anatomiques et morphologiques de l'appareil foliaire. Ann. Sci. Forest. 34(4), 265 – 284.

AUSSENAC G., 1983

Le cèdre, essai d'interprétation bioclimatique et écophysologique. CR Colloque de Bioclimatologie Méditerranéenne. 18 – 20 mai 1983. 4 – 8.

AUSSENAC G., 1984

Rôle de la micrométéorologie et de la bioclimatologie en sylviculture. La Météorologie 7(5) : 11 – 17.

BALDY C., 1973

Contribution à l'étude de la répartition du rayonnement d'origine solaire dans les couverts de pins. Agricultural Meteorology, 11, 123 – 133.

BOUCHET R.J., 1976

Brise - vent in Techniques Agricoles 12 (1976) 14 p.

BAUMGARTNER A., 1961

Baum und Wald in Windfeld. Allgemeine Forstzatschrift, München n° 13 - 14.

BLENK H., TRIENES H., 1956

Stromungs Technische Beiträge zum Windchutz. Zeitzchrift Grundlagen der Land Technik n° 8, I et II. Düsseldorf.

BONHOMME R., CHARTIER P., VARLET - GRANCHET C., 1971

Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs. Eclaircissement d'un plan horizontal au-dessus et aux différents niveaux de la culture. Ann. Agron. 22(4) : 383 - 396.

BONHOMME R., VARLET - GRANCHET C., 1977

Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. Etablissement des lois et vérifications expérimentales. Ann. Agron. 28 (6) : 567 - 582.

BOWEN J.S., 1926

The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. Phys. Rev. 27 : 779 - 787.

CACHAN P., 1974

Importance écologique des variations verticales microclimatiques du sol à la canopée dans la forêt tropicale humide. In PESSON P. Ecologie Forestière. La forêt : son climat, son sol, ses arbres. Ed. Gauthier - Villars. pp. 21 - 26.

CHARTIER P., 1967

Lumière, eau et production de matière sèche du couvert végétal. Ann. Agron. 18(3) : 301 – 331.

CHARTIER P., 1970

Etude de l'assimilation nette d'une culture couvrante. Thèse doctorat d'Etat. Université Paris – Sud. Centre Orsay. 263 p.

CHIAPALE J.P., 1974

Etude théorique des modifications d'albédo liées à l'aménagement du territoire. INRA, Station de Bioclimatologie, Montfavet. Note Technique M. 74/4. 64 p.

CHIAPALE J.P., 1975

A numerical model for estimating the modification of heat budget introduced the modification of heat budget introduced by hedges. Proc. Int. Conf. Heat and Mass Transfer in the Biosphere Dubrovnik. Scripbook Co. 457 – 466.

COMBRES J.C., BONHOMME R., BALDY C., GOILLOT C. et de PARCEVAUX S., 1970

Un pyranomètre linéaire destiné à la mesure du rayonnement sous couvert végétal. In Techniques d'Etudes des Facteurs Climatiques de la Biosphère INRA. Pub. 70 – 4. Paris 59 – 70.

COWAN I.R., 1968

Mass heat and momentum exchange between stands of plants and their atmospheric environment. Quart. J. R. Meteor. Soc. 94, 523 – 544.

DEACON E.L., 1949

Vertical diffusion in the lowest layer of the atmosphere. Quart. J.R. Meteor. Soc. 75 : 89 – 103.

DUCREY, 1972

Contribution à l'étude de la répartition du rayonnement dans une plantation de pins sylvestres. Document INRA, Station de Sylviculture et de Production. Note technique INRA/CNRF n° 70-3. 55 pp.

DYER, 1963

The ajustement of profiles and eddy fluxes. Quart. J. R. Meter. Soc., 89, 276 – 280.

FABRE J.P., 1976

Extension du Cèdre et risques d'attaques d'insectes. Rev. For. Française. 4(28) : 261 – 269.

GALOUX A., 1973

La Chênaie mélangée calcicole de Virelles. Blaimart. Flux d'énergie radiante, conversions et transferts dans l'écosystème (1964 – 1967). Station de Recherches des Eaux et Forêts. Groenendaal – Hoeilaart. Belgique. Travaux Série A n° 14.

GUYOT G., 1963

Les brise-vent. Modification du microclimat et amélioration de la production agricole. Ann. Agron. 14 : 429 – 488.

GUYOT G., 1972

Etude de l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle poreux en couche limite turbulente (Aérodynamique des brise-vent). Thèse de Docteur Ingénieur. Université de Paris VI. 163 p. + figures.

GUYOT G., BOUCHET R.J., CHIAPALE J.P., MALET P., SEGUIN B., VERBRUGGHE M., 1976

Climat et aménagement en pays de bocage INRA Station de Bioclimatologie Montfavet. Rapport de fin de contrat d'étude. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. 767 p.

GUYOT G., VERBRUGGHE M., 1976

Etude de la variabilité spatiale du microclimat à l'échelle parcellaire en zone bocagère. In CR. Table ronde CNRS. "Ecosystèmes bocagers". Rennes. 131 - 136.

GUYOT G., SEGUIN B., 1978

Influence du bocage sur le climat d'une petite région résultats des mesures effectuées en Bretagne AGRIC. METEOROL. 19 : 411 - 430.

GUYOT G., DELECOLLE R., SALEM B., 1986

Brise vent et rideaux abris avec référence particulière aux zones sèches. Cahier FAO conservation 15. 385 p.

JENSEN M., 1954

Shelter effect. The Danish Technical Press. Copenhagen. 264 p.

KLUG W., 1967

Determination of turbulent fluxes of heat and momentum from the wind profile. Quart. J. R. Meteo. Soc., 89, 276 - 280.

MAKKINK G.F., VANHEEMST H.D.J., 1970

Water Economy of a fictive crop, 1970. Agric. Res. Rep. 817 : 38 p.

MARTSOLF D.J., MARSHALL RITTER C., HATCH A.H., 1974

Effect of white latex point on temperature of stone fruit tree. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 100(2) : 122 – 129.

MAURY R., 1960

Le reboisement de la forêt de Bédoin et son enseignement. Ann. Ec. Nat. E. F., Nancy 17(1) : 119 – 153.

MILLER D.R., ROSENBERG N.J., BAGLEY W.T., 1975

Wind reduction by a highly permeable tree shelterbelt. Agric. Meteorol. 14(3) : 321 – 325.

MONTEITH J.L., 1965

Light distribution and photosynthesis in field crops. Ann. Bot. Vol. 29. n° 113. : 17 – 37.

MURUGO G., 1975

Simulation hydraulique de l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle perméable en vue de l'intégration des brise-vent dans la construction civile et le bâtiment. Mémoire de fin d'études. Conservatoire National des Arts et Métiers. 134 p.

NAEGLI W., 1946

Weitere Untersuchungen über die windverhältnisse in Bereich von windschutzstreifen. Annales de l'Institut Fédéral de Recherches Forestières. Suisse XXIV (2) : 659-737.

PERRIER A., 1973

Milieu atmosphérique des cultures in Agrometeorology in semi arid areas. South of the Sahara WMO n° 340. Genève.

PERRIER A., ITIER B., BERTOLINI J.M., BLANCO de PABLOS A., 1975

Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture. Exemples d'application. Ann. agron. 26(1) : 19-40.

PLATE E.J., 1971

The aerodynamics of shelterbelts. Agric. Meteorol. 8(3) : 203-222.

RAYNOR G.S., 1971

Wind and temperature structure in a coniferous forest and a contiguous field. Forest. Science 17(3) : 351-363.

ROSENBERG N.J., 1966

Influence of snow fence and corn windbreaks on microclimate and growth of irrigated sugar beets. Agronomy J. 58 : 469-475.

ROSENBERG N.J., 1966

Influence of snow fence and corn windbreaks on microclimate and growth of irrigated sugar beets. Agronomy J. 58 : 469-475.

ROUSSEL L., 1972

Photologie forestière. Masson et Cie Editeurs. Paris. 144 p.

SEGINER I., 1975

Atmospheric stability effect on windbreak shelter and drag. *Boundary layer Meteorology* 8 : 383 – 400.

SEGUIN B., 1973

Rugosité du paysage et diffusion atmosphérique. Etude théorique à partir des équation de SUTTON. *Atm. Env.* 7 : 429 – 442.

SHEPPARD A., 1958

Transfert across the earth's surface and through the air above. *Quart. J. R. Meteor. Soc.* 84 : 205 – 224.

SIMON J.C., DELECOLLE R., 1974

Maïs et bocage. Thèse de 3ème cycle. Faculté des Sciences de Rennes. 318 p.

SUTTON, 1949

The application to micrometeorology of the theory of turbulent flow over rough surface. *Quart. J.R. Meteor. Soc.* 75, n° 235.

TAKEDA K., 1966

On roughness length and zero plane displacement in the wind profil of the lowest air layer. *J. Met. Soc. Japan* 44(2) : 101 – 107.

TANNER C.B., 1960

Energy balance approach to evapotranspiration from crop. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 24 : 1 – 9.

TOTH J., 1970 - 1972

Historique du Cèdre sur le Mont-Ventoux. Bull. Soc. Et. Sci. Nat. Vaucluse : 51 - 75.

UCHIJIMA Z., 1962

Studies on the microclimate within the plan communities. J. Agric. Meteor. 18 : 1 - 2, 1 - 10 : 58 - 65.

Van EIMERN J., 1957

Über die Veränderlichkeit des Windschutzes. Wirkung einer Doppelbaumreihe bei Verschiedenen Meteorologischen Bedingungen Berichte Deutscher Wetterdienst 5. n° 2 : 193 - 210

Van EIMERN J., KARSCHON R., RAZUMOVA L.A., ROBERTSON G.W., 1964

Windbreaks and shelterbelts. World Meteorological Organization Techn. Note 59 W.M.O., n° 147 TP 70 : 188 p.

VERBRUGGHE M., PYRRHA P., 1975

Détermination des températures d'écorce d'arbres fruitiers. Note Technique INRA - STEFCE. 75 - 3 : 12p.

VERBRUGGHE M., QUIOT J.B., 1976

Ecologie et épidémiologie du virus de la mosaïque du concombre. II : Caractérisation microclimatique de parcelles de cultures maraîchères derrière brise-vent dans le Sud-Est de la France. INRA - STEFCE. Note Technique 76 - 5 : 23 p.

VERBRUGGHE M., BACULAT B., HANOCQ J.F., 1978

Etude de l'influence de la peinture blanche sur les variations de températures de la zone cambiale des troncs d'arbres fruitiers. Note technique INRA, STEFCE 78-4 : 17p.

VERBRUGGHE M., 1979

Contribution à l'étude des effets du microclimat sur la température d'écorce d'arbres fruitiers. INRA. Bioclimatologie - STEFCE. Note Interne 79.1 38p.

VEBRUGGHE M., FABRE J.P., 1988

Microclimatologie de deux peuplements de Cèdre *cedrus atlantica Manetti* dans le sud de la France (sous presse). Ann. Sci. Forestières.

VIGOUROUX A., 1979

Incidence des basses températures sur la sensibilité du pêcher au dépérissement bactérien (*Pseudomonas mors-prunorum Fsp persicae*). Ann. Phytopathol. 11(2) : 231 - 239.

WOODRUFF N.P., 1954

Shelterbelt and surface barrier. Effect on wind velocities evaporation, house heating, snowdrifting. Agric. Experiment Station. Kansas State College of Agriculture and Applied Science. Manhattan Tec. Bull. 77.

BIBLIOGRAPHIE

ALLEN L.H.Jr, 1968

Turbulence and wind-speed spectra within Japanese Larch Plantation. J. Appl. Meteo. 7, 73-78.

ARBEZ M., FERRANDEZ P., UYAR M., 1978

Contribution à l'étude de la variabilité géographique des Cèdres. Ann. Sci. Forest. 35(4) : 265-284.

BAYNTON H.W., BIGGS W.G., HAMILTON H.L.Jr, SHERR P.E. et WORTH J.J.B., 1965

Wind structure in and above a tropical forest. J. Appl. Meteo. 4 : 670-675.

BELOT Y., BAILLE A., SEGUIN B., 1971

Etude par simulation numérique de la diffusion et du dépôt des gaz et aérosols dans les couverts végétaux. XIVE Journées de l'Hydraulique. Paris 1976. 6 p.

BELOT Y., BAILLE A., DELMAS J.L., 1976

Modèle numérique de dispersion des polluants atmosphériques en présence de couverts végétaux. Application aux couverts forestiers. Atmospheric Environment 10(2) : 25 p.

BOUCHET R.J., GUYOT G., 1972

Aménagement du territoire et microclimat, problème du bocage. Extrait du procès verbal. Séance du 8 nov. 1972. Académie d'Agriculture de France : 1224-1240.

BUSINGER J.A., 1973

Turbulent transfer in the atmospheric surface layer. In Workshop on Micrometeorology. Duane A. Hangen Editor. American Meteorological Society : 67 - 100.

CHARFI M., 1980

Contribution à l'analyse de l'influence des brise vent sur les facteurs climatiques et la production agricole en Tunisie. Thèse Docteur Ingénieur. Université Aix-Marseille. Faculté Saint-Jérôme. 166 p.

CHARTIER P., PERRIER A., VERBRUGGHE M., 1971

Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de maïs. Ann. Agro. 22(4) : 367 - 381.

DEACON E.L., 1950

Radiative heat transfer in the air near the ground. Austra J. Sci. Res. Serie A, n° 3.2 : 274 - 283.

De VRIES, 1956

On the evaluation of the thermal (or eddy) diffusivity from the diurnal temperature wave. Netherlands Journal of Agricultural Sciences. Vol. 4, n° 1. 136 - 139.

DOUGUEDROIT A., 1976

Les paysages forestiers de Haute-Provence et des Alpes-Maritimes. Connaissance du Monde Méditerranéen. 550 p. Aix-en-Provence EDISUD.

GEIGER R., 1957

The climate near the ground. Rev. Ed. Tr by Milroy N. Steward et al. Cambridge Mass., Harvard. University Press. 482 p.

GUINAUDEAU C., 1984

Les brise-vent au Sénégal. Rapport technique. 64 p. PCT FAO.

GUYOT G., 1972

Etude de l'écoulement de l'air au voisinage d'un obstacle poreux en couche limite turbulente (Aérodynamique des brise-vent). Thèse de Docteur Ingénieur. Université de Paris VI. 163 p.

GUYOT G., DEVILLARD, 1979.

"Le climat d'Avignon". Essai d'interprétation des données du poste climatologique de l'INRA à Avignon - Montfavet". Ed. SEI. C.N.R.A. Versailles 43p.

HAGEN L.J., SKIMUREEL, 1971

Turbulent velocity fluctuations and vertical affected by windbreak porosity. Trans. Amer. Soc. Agr. Engin. 14 : 634 - 637.

HANOCQ J.F., 1978

Système de visualisation pour acquisition de données climatiques. AANDERA. Note technique. INRA - STEFCE. 78-3 : 13 p.

INRA, CNRS, Université de Rennes, 1976

Les bocages "Histoire, Ecologie, Economie". Ed. J. MISSIONIER. ENSA Rennes, 586 p.

KONSTANTINOV L.K., SHKREBA V.S., 1973

Les régimes de température et de radiation des arbres fruitiers sur des versants diversement orientés. Dokl. Akad. Im. Lenina. Vol. 10, pp. 17 – 18.

LEFEUVRE J.C., 1988

Les enjeux du bocage in "forêt entreprise", n° 52, p. 9 – 15.

MAKKINK G.F., VANHEEMST H.D.J., 1974

Water Economy of a fictive crop. Agric. Res. Rep. 817 (1974). 38 p.

MATSUDA M., BAUMGARTNER A., 1975

Ökosystematische Simulation des Nutzeffektes der Sonnenenergie für Wälder. Forstw (3). 94 : 89 – 104.

MERONEY R.N., 1968

Characteristics of wind and turbulence in and above model forest. J. Appl. Meteo. 7 : 780 – 788.

MILLER D.R., ROSENBERG N.J., BAGLEY W.T., 1975

Wind reduction by a highly permeable tree shelterbelt. Agric. Meteorol. 14(3) : 321 – 335.

MUNN R.E., 1966

Descriptive micrometeorology. Academic Press. INC. Ed. London : 245 pp.

NAEGLI W., 1953

Untersuchungen über die Windverhältnisse in Bereich von Schilfrohwänden. Annales de l'Institut Fédéral de Recherches Forestières. Suisse. 29(2) : 213 – 266.

PARCEVAUX de S., 1972

Les feuilles, le climat et le paysage. In Sciences Progrès Découvertes. Juillet – Août 1972. 23 – 30.

PARCEVAUX de S., GUYOT G., 1980

Bioclimatologie et aménagement du bocage. BTI Ministère de l'Agriculture. N° 353 – 355 : 631 – 656.

PEGUY C.P., 1970

Précis de climatologie. 2ème édition Masson et Cie Editeurs. Paris. 468 p.

PERRIER A., SEGUIN B., 1970

Méthodes et techniques de détermination des coefficients de transfert et des flux dans l'air. In Techniques d'Etudes des Facteurs Physiques de la Biosphère. INRA, Paris : 425 – 446.

PLATE E.J., 1971

The aerodynamics of shelterbelts. *Agric. Meteorol.* 8(3) : 203 – 222.

PARDE J., 1974

Le microclimat en forêt, in PESSON P. *Ecologie Forestière, la forêt : son climat, son sol, ses arbres, sa faune*, 1 – 19, Gauthier – Villars. Ed. Paris. 382 p.

PRIMAULT B., 1954

L'influence de l'insolation sur la température du cambium des arbres fruitiers. *Revue romande. Agric. Viti. Arbo.* 10(8) : 26 – 28.

QUIOT J.B., MARROU J., LABONNE G., VERBRUGGHE M., 1979

Ecologie et Epidimiologie du Virus de la Mosaïque du Concombre dans le Sud – Est de la France. Description du dispositif expérimental. *Ann. Phytopathol.* 11(3) : 265 – 475.

QUIOT J.B., VERBRUGGHE M., LABONNE G., LECLANT F., MARROU J., 1979

Ecologie et épidémiologie du Virus de la Mosaïque du Concombre dans le Sud – Est de la France. IV : Influence des brise – vent sur la répartition des contaminations virales dans une culture protégée. *Ann. Phytopathol.* 11(3) : 265 – 475.

QUIOT J.B., DEVERGNE J.C., CARDIN L., VERBRUGGHE M.,
MARCHOUX G., LABONNE G., 1979

Ecologie et épidémiologie du Virus de la Mosaïque du Concombre dans le Sud Est de la France. VII Répartition de deux types de populations virales dans des cultures sensibles. Ann. Phytopathol. 11(3) : 265 – 475.

ROBERT Y., BRUNEL G., MALET P., BAUTRAIS P., 1976

Distribution spatiale de pucerons ailes et de diptères dans une parcelle de bocage. In CR Table ronde CNRS. Les Bocages Histoire Ecologie Economie. INRA CNRS et Université de Rennes. Ed. J. MISSONIER ENSA Rennes : 427 – 435.

ROSENBERG N.J., 1966

Influence of snow fence and corn windbreaks on microclimate and growth of irrigated sugar beets. Agronomy J. 58 : 469 – 475.

SCHUMACHER R., FANKHAUSER F., STADLER W., 1977

Einfluss eines Kalkanstriches auf die Temperaturschwankungen im Bereich des Kambiums von Apfelbaumsträmmen in der Schweiz, Zeitschrift für Obst und Weinbau. 113(86) : 21 – 29.

SEGUIN B., 1971

Etude théorique de l'interaction entre le transfert radiatif et les échanges turbulents dans les basses couches de l'atmosphère. Thèse de Docteur Ingénieur. Université de Provence. 60 p.

SKIMORE E.L., JACOBS H.S., HAGEN L.T., 1972

Microclimate modifications by slat fence windbreaks. Agron. Journ. 64 : 160–162.

SOLTNER D., 1977

"L'arbre et la haie". 4e Ed. Coll. Sciences et Techniques Agricoles. p. 1–112.

SUTTON O.G., 1949

The application to micrometeorology of the theory of turbulent flow over rough surface. Quarterly journal royal meteorological society. Vol. 75. October 1949. n° 326.

SWINBANK W.C., 1964

The exponential wind profile. Quart. J. R. Meteor. Soc. 384 : 119–136.

TOTH J., 1982

Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération naturelle du Cèdre de l'Atlas : *Cedrus atlantica Manetti* dans le Sud de la France. Thèse Faculté des Sciences et Techniques de Marseille. Saint-Jérôme. 136 p.

Van EIMERN J., KARSCHON R., RAZUMOVA L.A., ROBERTSON G.W.,
1964

Windbreaks and shelterbelts. Organisation Meteorologique Mondiale. Tech. Note n° 39 (WMO n° 147 TP 70). 188 p.

VIGOUROUX A., 1974

Obtention de symptômes de bactériose du pêcher (*Pseudomonas mors-prunorum* f. sp. *Persicae*) sur rameaux de pêcher détachés et conservés en survie effet du froid. Ann. Phytopathol. 6(1) : 95–98.

WEBB E.K., 1965

Aerial microclimate. Meteorological monographs. Americ. Meteor. Soc. 6(28) :
27 - 38.

WOODRUFF N.P., READ R.A., CHEPIL W.S., 1959

Influence of a field windbreak on summer wind movement and air temperature.
Technical Bull. n° 100. Agric. Experiment Station. Kansas State University of
Agricultural and Applied Science Manhattan. Technical Bul. 100 : 24 p.