

UNIVERSITE DE NEUCHATEL

•
INSTITUT DE GEOGRAPHIE

•
Espace Louis–Agassiz 1
CH – 2001 Neuchâtel

Sabina Läderach

*Les caractéristiques du
climat forestier et son
influence sur le
bien-être*

Le cas de l'été 2003 en Suisse

MEMOIRE DE LICENCE

Sous la direction du Prof.

MARTINE REBETEZ

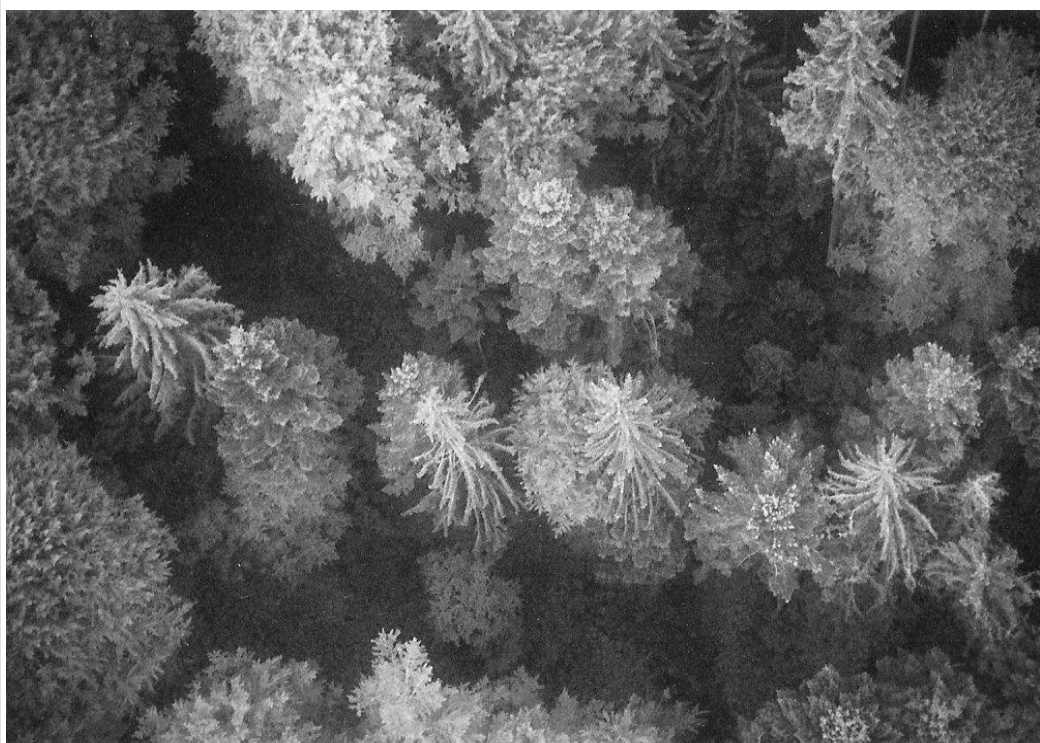
Encadré par

VALENTINE RENAUD

Expert : Dr.

MIC HAEL REINHARD

▪ *Juin 2007* ▪



Remerciements

Tout d'abord, je voudrais remercier Valentine Renaud qui a toujours été présente ; pour ses conseils en tant que spécialiste et pour ses encouragements en tant qu'amie, pour sa patience, pour son travail de « dictionnaire de synonymes », de relecture et de correction du texte. Il est cependant évident que les éventuelles erreurs dans ce texte ne sont en aucun cas de sa responsabilité.

Je suis reconnaissante envers Martine Rebetez pour m'avoir offert l'opportunité de contribuer à un projet de recherche concret et pour m'avoir permis de mieux connaître le monde de la recherche. C'était une expérience très enrichissante. Je la remercie également pour sa précieuse disponibilité.

Je remercie vivement Laetitia Moulin pour sa remarquable capacité de motivation et de « remise en confiance » ainsi que pour les heures qu'elle a consacré à la relecture de ce travail. Il va de soi qu'elle n'est aucunement responsable pour d'éventuelles déclarations erronées de l'auteur.

Ma reconnaissance va aussi à Heinz Schneider qui a su rendre pour moi certaines formules mathématiques limpides. Je remercie également Claire Guenat, Jean Combe et Andy Siegenthaler d'avoir si généreusement partagé leurs connaissances.

Enfin et particulièrement, je voudrais remercier les membres de ma famille qui m'ont toujours soutenu pendant mes études et surtout pendant les périodes de doute. Ils ont toujours pris le temps de m'écouter et de discuter, me permettant d'ordonner mes pensées et me proposant des points de vue complémentaires.

Je remercie en outre tous ceux qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à la réalisation de ce mémoire.

Photo couverture : Sabina Läderach

Résumé

Les dernières décennies ont été caractérisées par le dépassement régulier du record des **périodes les plus chaudes depuis le début de l'enregistrement des mesures météorologiques** et il devient de plus en plus clair que nous devons apprendre à faire face à des situations de canicule de plus en plus fréquentes. Est-ce que la forêt peut jouer un rôle favorable pour notre bien-être dans ce contexte? **L'enjeu de ce mémoire est de répondre à cette question.** Cela dans un premier temps en comparant les différences entre le climat forestier et le climat en campagne et cela pour la **période d'avril à octobre 2003. Pour ce faire, nous nous basons** sur les données météorologiques relevées dans 14 sites géographiques de Suisse mises à disposition par le programme LWF (Langfristige Waldökosystem Forschung). Dans un deuxième temps, ces résultats seront mis en relation avec les concepts de la bioclimatologie **humaine par l'utilisation de** deux indices thermo-hygrométriques : le « Temperature-Humidity Index » (THI) **et l'indice** « Humidex ».

Notre analyse des paramètres météorologiques (température, humidité, rayonnement, vent) **a montré que le climat est généralement plus tempéré en forêt qu'à découvert, mais pour** quelques-uns de ces éléments comme les minima de **température ou l'humidité de l'air** relative, ces écarts restent minimes. Le type de végétation joue un rôle déterminant dans la définition du microclimat de ces différents sites. Ainsi, les écarts des maxima de température sont particulièrement marqués dans les stations caractérisées par des hêtraies, tandis que la **température est plus élevée en forêt dans une pinède. Ces écarts sont d'autant plus prononcés lorsqu'il fait particulièrement chaud comme c'était le cas pendant l'été 2003.**

L'application des deux indices bioclimatiques retenus nous indique que le microclimat forestier observé dans la plupart de ces sites peut effectivement avoir un effet bénéfique sur le **bien-être humain. A l'exception des forêts de pin, nous constatons généralement un** nombre plus important de journées confortables sous couvert forestier que dans un champ avoisinant. Toutefois, les résultats des deux indices varient considérablement.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| PREMIERE PARTIE..... | 11 |
| INTRODUCTION | 11 |
| 1. Introduction | 13 |
| 2. Question de départ | 14 |
| 3. Bilan des connaissances | 14 |
| 3.1. Microclimatologie | 14 |
| 3.1.1. Développement de la recherche | 14 |
| 3.1.2. Quelques bases de climatologie | 15 |
| 3.1.3. Influence des particularités régionales : la microclimatologie | 16 |
| 3.2. Influence de la forêt : la microclimatologie forestière | 17 |
| 3.2.1. Développement de la recherche | 17 |
| 3.2.2. Questions de recherche actuelles | 18 |
| 3.2.3. Quelques spécificités du climat en forêt | 18 |
| 3.2.4. Lacunes | 21 |
| 3.3. La bioclimatologie humaine | 21 |
| 3.3.1. Introduction | 21 |
| 3.3.2. Les origines de la discipline | 22 |
| 3.3.3. Développement récent | 22 |
| 3.3.4. Notion de confort et de stress climatique | 23 |
| 3.3.5. Fondements et grandes lignes de recherches | 23 |
| 3.4. L'été 2003 | 25 |
| 3.4.1. La situation météorologique | 25 |
| 3.4.2. Ses implications sanitaires | 26 |
| 4. Système d'hypothèses | 27 |
| DEUXIEME PARTIE | 29 |
| DONNEES ET METHODES | 29 |
| 5. Description du terrain | 31 |
| 5.1. Les stations de mesure et leurs caractéristiques | 31 |
| 5.2. Les régions biogéographiques et les étages de végétation | 33 |
| 6. Les instruments de mesures | 33 |
| 7. Description des données | 34 |
| 7.1. Les paramètres météorologiques | 34 |
| 7.2. Fiabilité des données | 34 |

| | | |
|-------------------------------|--|-----------|
| 8. | Les méthodes | 36 |
| 8.1. | La comparaison des climats..... | 36 |
| 8.2. | Les indices bioclimatiques | 37 |
| 8.2.1. | Introduction | 37 |
| 8.2.2. | Le complexe thermo-hygrométrique et la température effective | 37 |
| 8.2.3. | Le THI (Temperature Humidity Index) | 38 |
| 8.2.4. | L'indice Humidex | 39 |
| TROISIEME PARTIE | | 41 |
| RESULTATS ET DISCUSSION | | 41 |
| 9. | Les résultats : paramètres météorologiques..... | 43 |
| 9.1. | Le rayonnement (PAR) | 43 |
| 9.1.1. | Introduction | 43 |
| 9.1.2. | Importance de l'écart entre couvert et découvert | 43 |
| 9.1.3. | Discussion et conclusion | 46 |
| 9.2. | La température..... | 48 |
| 9.2.1. | Introduction | 48 |
| 9.2.2. | Importance de l'écart entre couvert et découvert | 50 |
| 9.2.3. | Le niveau de significativité de l'écart | 53 |
| 9.2.4. | Corrélation entre écarts prononcés et forte chaleur | 55 |
| 9.2.5. | Discussion et conclusion | 56 |
| 9.3. | Humidité de l'air relative | 62 |
| 9.3.1. | Introduction | 62 |
| 9.3.2. | Importance de l'écart entre couvert et découvert | 63 |
| 9.3.3. | Le niveau de significativité de l'écart | 66 |
| 9.3.4. | Corrélation entre humidité et température | 67 |
| 9.3.5. | Discussion et conclusion | 69 |
| 9.4. | Vitesse du vent..... | 69 |
| 9.5. | Synthèse des résultats | 70 |
| 10. | Les résultats : indices bioclimatiques | 71 |
| 10.1. | Introduction..... | 71 |
| 10.2. | Situation générale | 71 |
| 10.3. | Situation par station | 73 |
| 10.4. | Situation du 1 au 14 août | 78 |
| 10.5. | Discussion et conclusion | 80 |
| 11. | Discussion générale | 81 |
| QUATRIEME PARTIE | | 85 |
| CONCLUSION | | 85 |
| 12. | Conclusion..... | 87 |
| 12.1. | Quelle est la réponse à notre question de départ ?..... | 87 |
| 12.2. | Quels sont les éléments surprenants de notre recherche et ceux qui relativisent notre question de départ ? | 88 |
| 12.3. | Quelles sont les applications possibles des résultats d'une telle démarche? .. | 89 |
| 12.4. | Qu'est-ce qui pourrait être fait pour compléter notre réponse? | 90 |
| BIBLIOGRAPHIE | | 93 |
| ANNEXES | | 99 |

Table des illustrations

| | |
|--|----|
| Fig. 3.1. Présentation schématique de l'ombrage en pente et sur une plaine | 19 |
| Fig. 5.1. Les stations de mesures LWF | 31 |
| Fig. 5.2. Les stations en fonction des régions biogéographiques et des étages de végétation | 33 |
| Fig. 8.1. Les différentes classes du THI selon E.C. Thom, en °C | 39 |
| Fig. 8.2. Les différentes classes d'HUMIDEX | 39 |
| Fig. 9.1. Différence couvert - découvert du PAR pour les moyennes et les maxima | 44 |
| (%, juin - août 2003) | 44 |
| Fig. 9.2. Maxima du PAR sous couvert et à découvert à Isonne (juin -août 2003) | 45 |
| Fig. 9.3. Maxima du PAR sous couvert et à découvert à Neunkirch (juin - août 2003) | 45 |
| Fig. 9.4. Maxima du PAR sous couvert et à découvert à Celerina (juin - août 2003) | 45 |
| Fig. 9.5. Maxima du PAR sous couvert et à découvert à Isonne (avril - octobre 2003)..... | 46 |
| Fig. 9.6. Différence couvert – découvert du PAR pour les moyennes et les maxima à Isonne.46 (%, juin - août 2003 et avril 2003) | 46 |
| Fig. 9.7. Maxima du PAR sous couvert et à découvert à Vordemwald (avril - octobre 2003).47 | 47 |
| Fig. 9.8. Maxima de température sous couvert et à découvert à Lausanne (avril et octobre 2003) | 49 |
| Fig. 9.9. Minima de température sous couvert et à découvert à Lausanne (avril et octobre 2003) | 49 |
| Fig. 9.10. Minima de température sous couvert et à découvert à Vordemwald (avril et octobre 2003) | 49 |
| Fig. 9.11. Les écarts les plus prononcés pour les maxima de température | 50 |
| Fig. 9.12. Comparaison des maxima de température sous couvert et à découvert à Neunkirch et à Viège | 51 |
| Fig. 9.13. Hiérarchie des maxima pour avril à octobre et pour juin à août | 51 |
| Fig. 9.14. Les écarts les plus et les moins prononcés pour les minima de température | 52 |
| Fig. 9.15. Comparaison des minima de température sous couvert et à découvert à Celerina et à Isonne | 52 |
| Fig. 9.16. Hiérarchie des minima pour avril à octobre et pour juin à août | 53 |
| Fig. 9.17. Les stations selon le niveau de significativité des écarts (Mann-Whitney) | 54 |
| Fig. 9.18. Test de corrélation entre la température à découvert et l'écart couvert-découvert (R²) | 55 |
| Fig. 9.19. Maxima de température comparés au PAR sous couvert au Parc National | 56 |
| Fig. 9.20. Significativité des écarts couvert - découvert des maxima des températures et différentes caractéristiques des stations de mesures..... | 57 |
| Fig. 9.21. Significativité des écarts couvert – découvert des minima des températures sous et différentes caractéristiques des stations de mesures..... | 59 |
| Fig. 9.22. Différences couvert – découvert des maxima de température à Isonne (avril – octobre 2003) | 60 |
| Fig. 9.23. Différences couvert – découvert des maxima de température à Beatenberg (avril - octobre 2003) | 61 |
| Fig. 9.24. Différences couvert – découvert des maxima de température à Novaggio (avril - octobre 2003) | 61 |
| Fig. 9.25. Différences couvert – découvert des maxima température à Viège (avril à octobre 2003) | 62 |
| Fig. 9.26. Minima d'humidité de l'air relative sous couvert et à découvert à Jussy (avril - octobre 2003) | 63 |

| | |
|---|----|
| Fig. 9.27. Maxima d'humidité de l'air relative sous couvert et à découvert à Jussy (avril - octobre 2003) | 63 |
| Fig. 9.28. Les écarts les plus prononcés pour les maxima d'humidité de l'air relative | 64 |
| Fig. 9.29. Comparaison des maxima d'humidité de l'air relative sous couvert et à découvert à Viège et à Novaggio (avril – octobre 2003) | 64 |
| Fig. 9.30. Hiérarchie des maxima d'humidité de l'air pour avril à octobre et pour juin à août 2003 | 65 |
| Fig. 9.31. L'écart le plus et le moins prononcé pour les minima d'humidité de l'air relative .. | 65 |
| Fig. 9.32. Comparaison des minima d'humidité de l'air relative sous couvert et à découvert à Vordemwald et à Viège (avril – octobre 2003) | 66 |
| Fig. 9.33. Hiérarchie des minima d'humidité de l'air pour avril à octobre et pour juin à août 2003 | 66 |
| Fig. 9.34. Les stations selon le niveau de significativité des écarts entre les maxima d'humidité de l'air relative couvert - découvert (Mann-Whitney) | 67 |
| Fig. 9.35. Test de corrélation entre l'humidité de l'air relative et la température sous couvert et à découvert (R^2) | 68 |
| Fig. 9.36. Maxima de température comparés à l'humidité de l'air relative correspondante sous couvert (avril - octobre 2003, Isonne) | 68 |
| Fig. 9.37. Maxima de température comparés à l'humidité de l'air relative correspondante à découvert (avril - octobre 2003, Bettlachstock) | 69 |
| Fig. 10.1. Nombre total de jours par niveau de confort selon THI (juin - août 2003) | 72 |
| Fig. 10.2. Nombre total de jours par niveau de confort selon HUMIDEX (juin - août 2003) .. | 72 |
| Fig. 10.3. : Répartition des station selon leur niveau de confort par indice (THI, Humidex, juin - août 2003) | 73 |
| Fig. 10.4. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Celerina (juin - août 2003) ... | 73 |
| Fig. 10.5. Nombre de jours par niveau de confort selon THI au Parc National (juin – août 2003) | 74 |
| Fig. 10.6. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex à Celerina (juin - août 2003) | 74 |
| Fig. 10.7. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Chironico (juin - août 2003) .. | 75 |
| Fig. 10.8. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex à Jussy (juin – août 2003) .. | 75 |
| Fig. 10.9. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Lausanne (juin et août 2003) .. | 76 |
| Fig. 10.10. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Othmarsingen (juin - août 2003) | 76 |
| Fig. 10.11. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex à Othmarsingen (juin – août 2003) | 77 |
| Fig. 10.12. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Viège (juin et août 2003) ... | 77 |
| Fig. 10.13. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex à Viège (juin et août 2003) | 78 |
| Fig. 10.14. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Neunkirch (1^{er} - 14 août 2003) | 78 |
| Fig. 10.15. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Beatenberg (1^{er} - 14 août 2003) | 79 |
| Fig. 10.16. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex à Beatenberg (1^{er} - 14 août 2003) | 79 |
| Fig. 10.17. Courbe illustrant la mortalité en Suisse durant l'été 2003 | 80 |
| Fig. 11.1. Influence de la température et de l'humidité de l'air sur le THI à Neunkirch à découvert | 81 |

PREMIERE PARTIE

INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

Les dernières décennies ont été caractérisées par le dépassement régulier du record des **périodes les plus chaudes depuis le début de l'enregistrement des mesures météorologiques** et il devient de plus en plus clair que nous devons apprendre à faire face à des situations de canicule de plus en plus fréquentes. Est-ce que la forêt peut jouer un rôle favorable pour notre bien-être dans ce contexte?

Il y a actuellement tout un débat autour de la question de la multifonctionnalité de la forêt, qui a été longtemps valorisée essentiellement **pour la production de bois. Cependant il s'est avéré qu'en Suisse et ailleurs le financement de l'entretien des forêts ne peut plus être couvert par l'exploitation du bois seul et il est donc** devenu nécessaire de justifier des dépenses publiques **d'entretien**. WILD-ECK (2002) souligne que le concept de la multifonctionnalité de la forêt peut permettre de résoudre cette impasse. Ainsi, la forêt remplirait une multitude de fonctions (biens et services) au bénéfice de la société, des fonctions dont il faut maintenant estimer la valeur monétaire pour déterminer la contribution qui peut être demandée aux autorités publiques. **L'estimation financière des bienfaits de la forêt est déjà bien avancée : nous avons par exemple une idée concrète de son rôle protecteur (avalanches, instabilité du terrain, etc.) par contre l'étude d'autres fonctions n'en est qu'aux prémices (rôle tampon contre le bruit, rôle purificateur de l'air, etc.).** Différents auteurs (p.ex. WILD-ECK, 2002) se sont intéressés à la question de la fonction récréative de **la forêt. D'autres se penchent sur la problématique** de la fonction curative de la forêt, dont **l'effet modérateur du climat participe.**

L'enjeu de ce mémoire est d'étudier dans un premier temps les différences entre le climat à **l'intérieur de la forêt** et le climat à **découvert pour la période d'avril à octobre 2003. L'attention sera mise plus particulièrement sur la semaine la plus chaude en mois d'août** et nous nous intéresserons aux différences de **température, d'humidité de l'air et de vent. Nous nous baserons largement pour cette partie sur les recherches réalisées dans le champ de la microclimatologie forestière. Dans un deuxième temps, ces résultats seront mis en relation avec les concepts de la bioclimatologie par l'utilisation d'indices bioclimatiques concernant le bien-être humain.**

Ce travail s'inscrit dans le projet COST E-39, la coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique, et plus particulièrement dans l'action E-39 qui s'intitule « Forests, Trees and Human Health and Wellbeing ». Ce projet de recherche européen a pour objectif de mieux comprendre la contribution de la forêt, des arbres et de sites naturels au bien-être humain. Les différentes recherches sont donc centrées autour des priorités de santé en Europe et visent à contribuer aux choix de la politique sanitaire européenne. De plus, il est envisagé de créer un réseau de recherche dans plusieurs domaines, notamment la science forestière, les sciences **de l'environnement et les sciences sociales** ainsi que la recherche médicale.¹ En Suisse, la comparaison du microclimat forestier **avec le climat hors couvert est réalisé par les collaborateurs du WSL, l'institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage.**²

Dans ce cadre, une thèse est en cours, réalisée par V.Renaud et dirigée par M.Rebetez. Il **s'agit de mesurer l'influence de la forêt sur le bien-être** humain par une comparaison du climat forestier avec le climat à ciel ouvert, se basant sur les données météorologiques du programme LWF. Ces mesures ont débutés en 1997 et sont en cours continuellement depuis. Ce travail repose donc sur une collaboration étroite entre V.Renaud et moi-même.

¹ Pour **des informations plus spécifiques sur le projet COST et l'action E-39:**
<http://www.cost.esf.org/index.php?id=171> ; <http://www.e39.ee/en/m-9>.

² Pour des informations plus détaillées sur le WSL: <http://www.wsl.ch>.

Il consiste simplement en un morceau d'une mosaïque plus vaste, c'est-à-dire à la période particulière de l'été 2003. La canicule de cet été-là nous a montré les conséquences sanitaires possibles du réchauffement climatique. Et la situation sanitaire dramatique dans certaines régions de l'Europe, notamment en France, mais aussi en Suisse avec un millier de morts excédentaires, nous a indiqué l'importance de trouver des stratégies face aux conséquences des fortes chaleurs. En étudiant un éventuel effet bénéfique de la forêt sur la santé humaine, nous espérons pouvoir contribuer à cet objectif.

2. QUESTION DE DÉPART

Après avoir situé ce travail dans son contexte, nous pouvons formuler la question de départ de la manière suivante : La forêt peut-elle, grâce à son climat particulier, avoir un effet bénéfique sur le bien-être humain lors de périodes particulièrement chaudes ?

Nous verrons dans le bilan des connaissances que les disciplines auxquelles touche cette recherche, la microclimatologie forestière et la biométéorologie humaine, sont déjà considérablement développées. Cependant, notre recherche nous pousse à nous intéresser à la zone de contact entre ces deux branches, c'est-à-dire au lien entre le microclimat particulier de la forêt et son influence sur l'organisme humain. Dans notre travail, nous si contribuons à cette connaissance spécifique et interdisciplinaire, à une échelle géographique nationale et une échelle temporelle semestrielle, d'avril à octobre 2003.

3. BILAN DES CONNAISSANCES

Ce chapitre qui traite du cadre théorique de notre recherche sera consacré à plusieurs thématiques, comme nous venons de l'énoncer. Tout d'abord nous présenterons un résumé du développement et de quelques éléments de la connaissance en microclimatologie pour ensuite introduire une branche spécifique de ce champ de recherche, la microclimatologie forestière qui nous intéresse plus particulièrement pour notre travail. Dans un troisième sous-chapitre, nous présenterons une branche spécifique de la connaissance de l'influence du climat sur les organismes, la bioclimatologie humaine. Finalement, nous nous attarderons sur la situation météorologique particulière de l'été 2003 ainsi que sur les impacts sanitaires de cette vague de chaleur.

3.1. MICROCLIMATOLOGIE

3.1.1. Développement de la recherche

Les phénomènes atmosphériques interpellent l'humanité depuis la nuit des temps. En effet, la première synthèse parvenue à notre connaissance est celle d'Aristote qui encore aujourd'hui conserve beaucoup de sa pertinence. La météorologie et la climatologie en tant que sciences, dans le sens moderne du terme, se sont développées à partir du XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle avec l'avènement des instruments de mesure. Finalement, au tournant du XIX^{ème} et du XX^{ème} siècle, la météorologie et la climatologie se sont séparées en deux branches distinctes. (BROCKHAUS ENZYKLOPÄDIE, 2001, Band 14, p.562).

Le critère principal de distinction entre la climatologie et la météorologie est celui du temps. De façon très synthétique, on peut dire que la météorologie s'occupe de phénomènes observés à une échelle de temps relativement courte, tandis que la climatologie s'intéresse à des phénomènes observables à long terme. L'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) définit le terme « climat » de la façon suivante:

« Le climat est habituellement défini comme le « temps moyen » ou, de manière plus rigoureuse, comme la description statistique du temps à partir de moyennes et de la variabilité temporelle de certains valeurs, relevées sur plusieurs décennies (**généralement trois selon la définition de l'OMM**). Ces valeurs sont le plus souvent des variables de surface comme la température, les précipitations et le vent. Enfin, **plus généralement, le climat est la description de l'état du système climatique.** ([http://www.ipcc.ch/pub/IPCCCTP.II\(F\).pdf](http://www.ipcc.ch/pub/IPCCCTP.II(F).pdf). p. 17) »

La microclimatologie forme une branche à l'intérieur de la climatologie. Pour ce qui est de l'histoire de la recherche en microclimatologie, nous nous référons à Rudolf Geiger, qui consacre une partie de son ouvrage à ce sujet (GEIGER et al., 2003, p. 4). Selon lui, cette discipline a connu ses débuts à la fin du XIX^{ème} siècle, quand Theodor Homén, un chercheur finlandais a commencé à s'intéresser aux mesures du bilan énergétique de différents types de sol. Cependant, Geiger considère Gregor Kraus comme le véritable père fondateur de la microclimatologie. Par la suite, ce sont Wilhelm Schmidt à Vienne et August Schmauss à Munich qui auraient fait progresser le savoir dans ce domaine.

Elève d'August Schmauss à Munich, Rudolf Geiger a lui-même rédigé un manuel de microclimatologie dans les années 60, qui a été réédité plusieurs fois depuis, et dont la version la plus actuelle est celle qui figure dans notre bibliographie (GEIGER et al. 2003). L'autre ouvrage de base est celui de T.R. Oke intitulé « Boundary Layer Climates » (OKE, 2000), publié pour la première fois en 1978 et disponible aujourd'hui en deuxième édition. Les deux ouvrages sont **structurés d'une manière très similaire. Ils commencent en exposant les bases du fonctionnement du système atmosphérique pour ensuite passer successivement du climat près d'un sol uniformément plat et sans couverture à un sol avec diverses types de couverture végétale pour terminer avec les spécificités du climat lié à une topographie non uniforme.** Les deux ouvrages contiennent également un chapitre consacré à la bioclimatologie. T.R. Oke ajoute une dernière partie qui traite des environnements modifiés **par les êtres humains. Son manuel se caractérise par l'importance donnée à une approche systémique.** Son ouvrage nous paraît bien accessible et permet une bonne introduction aux concepts de la **microclimatologie.** L'ouvrage de R. Geiger de son côté traite la microclimatologie de façon plus détaillée apportant au lecteur une compréhension profonde de la matière.

Après ce survol de l'histoire de la recherche en microclimatologie, nous passons dans le chapitre suivant à une synthèse des connaissances de cette branche.

3.1.2. Quelques bases de climatologie

Afin de quantifier le climat en forêt, nous allons utiliser divers paramètres météorologiques, **notamment le rayonnement, la température, l'humidité de l'air relative et la vitesse du vent.** Selon OKE (2000, pp. 6-7), **il ne suffit pas d'examiner uniquement la distribution spatiale de ces paramètres météorologiques, comme la climatologie classique du début du XX^{ème} siècle se serait contentée de faire, mais il faut s'intéresser aux processus sous-jacents qui déterminent ces paramètres. Il met donc l'accent sur les flux énergétiques ainsi que sur la présence d'eau, expliquant que les paramètres météorologiques ne sont que des mesures indirectes, influencées par ces deux facteurs de base.** Dans la partie suivante, nous aimerions suivre l'exemple d'Oke et mettre en évidence quelques-unes de ces connexions en observant les interactions **entre l'énergie, l'eau, la température et le vent.** Ces éléments nous semblent importants pour pouvoir mieux comprendre les interconnexions entre ces paramètres lors de l'analyse de nos résultats. **Il est évident qu'il s'agit là de phénomènes hautement complexes et que ce résumé n'en est qu'un aperçu.**

La totalité de l'énergie qui pénètre dans le système terre - atmosphère entre sous forme de rayonnement dont la source est avant tout le soleil. Lorsque ces vagues électromagnétiques se heurtent à des obstacles, elles sont en partie reflétées, transmises et absorbées, selon les

caractéristiques de l'obstacle (BROCKHAUS ENZYKLOPEDI, 2001, Band 21, pp. 215-216). Cette énergie radiative est transformée en d'autres types d'énergie. LEE (1978, p. 148) nous rappelle que l'énergie amenée par le rayonnement global s'utilise pour la conduction, la convection, l'énergie latente et l'énergie métabolique³. L'énergie latente est la part du rayonnement qui est utilisée pour l'évaporation de l'eau, c'est-à-dire pour son passage de l'état liquide à l'état gazeux. La quantité d'énergie destinée à ce processus dépend principalement de la présence d'eau et l'évaporation est un des facteurs primordiaux pour déterminer la teneur en humidité de l'air. Cependant, l'évaporation est limitée par la capacité de l'air de contenir de l'eau. C'est cette relation qui est exprimée par la notion d'humidité de l'air relative. L'énergie métabolique quant à elle représente la part du rayonnement utilisée par les plantes dans la photosynthèse et la création de biomasse (LEE, 1978, p. 138 – 139). Elle dépend en partie également de la présence de l'eau nécessaire pour la fabrication de glucose. C'est à ces deux processus, énergie latente et métabolique, qu'Oke se réfère lorsqu'il évoque l'importance de l'eau dans la détermination des paramètres météorologiques. L'énergie excédentaire lors de ces transformations résulte en un réchauffement de l'air ou des autres objets qui absorbent une partie du rayonnement. Dans l'équation présentée par Lee, cette différence de température se manifeste dans les processus de conduction et de convection, destinés à rétablir un équilibre entre différentes portions d'air. Finalement, les échanges d'air créés suite à ces différences de pression – l'air chaud étant moins dense que l'air froid – génèrent le vent. Ce résumé très schématisé nous permet d'avoir un aperçu de l'influence du rayonnement et de l'eau sur les différents paramètres météorologiques ainsi que des interconnexions qui existent entre les paramètres. Il reste à ajouter que la surface terrestre obtient pendant la journée un excès de rayonnement qui se manifeste par une augmentation de la température. La nuit par contre se caractérise par une perte d'énergie qui amène donc une diminution de la température.

3.1.3. Influence des particularités régionales : la microclimatologie

Afin de mieux comprendre les particularités du climat à l'intérieur de la forêt, il faudra nous intéresser à une branche spécifique du vaste champ de la climatologie, la climatologie forestière. Cette branche fait partie de la microclimatologie, elle s'intéresse donc au climat tel qu'il se manifeste à une petite échelle. En fait, la recherche relative au climat peut s'effectuer à diverses échelles et dans la littérature, on peut constater une certaine unanimité sur la dénomination de ces échelles. On parle d'échelle micro, d'échelle méso et finalement d'échelle macro, mais quelques auteurs introduisent en plus une échelle dite locale qui se situe entre l'échelle micro et méso. Notre travail se situe justement à cette échelle-là. Les ordres de grandeur de ces échelles peuvent varier légèrement d'un auteur à l'autre, mais l'ordre de grandeur présenté par OKE (2000, p. 3) reflète une bonne synthèse des diverses distances utilisées :

| | |
|------------------|-------------------|
| Echelle micro : | 0,01m – 1km |
| Echelle locale : | 100m – 50km |
| Echelle méso : | 10km – 200km |
| Echelle macro : | 100km – 100'000km |

Nous retrouvons des délimitations semblables chez FLEMMING (1994, p. 12) ou encore chez GEIGER et. al. (2003, p.2). Il faut souligner que la délimitation de ces surfaces est floue et qu'il s'agit de sphères connectées par des influences mutuelles.

³ $R_n = B + H + L_V + M$ (LEE, 1978, p. 148)

Les processus décrits dans le chapitre précédant sont modifiés aux différentes échelles spatiales **par la situation particulière, à la fois géomorphologique et biologique, d'un endroit précis. Les facteurs qui influencent le microclimat d'une station sont bien exposés** tant par GEIGER et. al. (2003) que par OKE (2000). Citons par exemple le fait que les différents types de sol **n'ont pas la même capacité de contenir de la chaleur et diffusent ainsi plus ou moins de chaleur vers l'air adjacent. Des courants d'air sont ainsi générés dans la zone de contact** entre deux types de surface, tels que les brises caractéristiques des côtes maritimes. Ou encore, **l'exposition de la pente peut considérablement modifier la part de rayonnement reçue par une surface et ainsi l'énergie à disposition de cet endroit. Comme c'est le cas pour** les différences créées par le type de sol, la topographie est, elle également, à la base de **courants d'air particuliers. Finalement, comme nous avons pu voir dans la partie précédente, la végétation influence également le microclimat particulier d'un site. C'est cet élément qui est au centre de l'intérêt de la microclimatologie forestière** et qui nous intéresse plus particulièrement pour notre recherche.

3.2. INFLUENCE DE LA FORÊT : LA MICROCLIMATOLOGIE FORESTIÈRE

3.2.1. Développement de la recherche

Il existe une vaste littérature sur la microclimatologie forestière. Ces recherches débutent au XIX^{ème} siècle et ont pour objectif avant tout la mise à disposition de connaissances qui permettent une gestion optimale de la forêt et de son renouvellement. Déjà depuis le début de la recherche concernant le microclimat de la forêt, les chercheurs ont travaillé avec des stations de mesures doubles, c'est-à-dire des comparaisons de mesures climatiques **sous couvert et à découvert. Lützke présente l'historique de ces observations** (LÜTZKE, 1961. pp. 17 - 20). Il constate que, vers la fin du XIX^{ème} siècle, il y avait des activités importantes dans plusieurs pays européens, dont les résultats étaient pourtant fortement critiqués. Ces premières recherches se seraient heurtées à plusieurs obstacles. Ces résultats doivent donc être utilisés avec précaution car **les instruments n'étaient pas encore très fiables, surtout par le fait que les thermomètres n'étaient pas protégés du rayonnement direct. De plus, le choix des emplacements des stations de mesure à découvert posait souvent problème. En effet, les instruments étaient fréquemment placés dans des clairières, or on sait aujourd'hui que le climat des clairières est en général caractérisé par des extrêmes de température encore plus marqués que pour un champ ouvert** (LÜTZKE, 1961). Les recherches suivantes ont souvent amené à considérer avec prudence les différences climatiques entre couvert et découvert, **particulièrement au sujet des différences de température. Malgré tout, l'idée d'un climat nettement plus tempéré en forêt comparé à un champ ouvert a perduré pendant toute la première moitié du XX^{ème} siècle, puisque selon Lützke pratiquement aucune recherche de comparaison de température n'a été réalisée entre-temps.**

Parmi les chercheurs du début du XX^{ème} siècle **jusqu'à aujourd'hui qui se sont intéressés aux spécificités du climat sous couvert forestier**, on peut citer GEIGER et. al. (2003), FLEMMING (1994), MITSCHERLICH (1981) ou encore LEE (1978). Concernant la comparaison du climat à couvert et à découvert, de nombreux articles ont été publiés depuis la recherche de Lützke conduite entre 1955 et 1956 (LÜTZKE, 1961 et 1967 ; AUSSENAC, 2000 ; CHEN et. al., 1992 ; CARLSON et. al., 1995 ; DAVIES-COLLEY et. al., 2000 ; FITZJARRALD et. al., 2001 ; GRIMMOND et. al., 2000 ; HOLST et. al., 2000 ; MORECROFT et. al., 1997 ; POTTER et. al., 2000). **Comme c'est le cas pour la microclimatologie forestière en général, ces comparaisons entre le climat à couvert et à découvert ont pour objectif de générer des connaissances sur la gestion de la forêt notamment par rapport à l'éclaircissage, aux risques du gel lors des reboisements ou encore par rapport aux risques de dégât dus au vent. Ainsi, Aussenac oriente sa recherche vers la gestion forestière et la problématique de la régénération de la**

forêt. Potter compare différentes parcelles avec des densités variables de recouvrement et Carlson étudie le rôle de la forme et de la taille des clairières.

3.2.2. Questions de recherche actuelles

La recherche actuelle en microclimatologie forestière touche à maintes problématiques. Il **s'agit d'abord** de mieux comprendre les processus qui régissent les interconnexions entre la forêt et le climat et ensuite **d'utiliser ce savoir pour l'élaboration de pratiques d'intervention dans l'écosystème forestier dans un objectif d'exploitation**. Ces dernières années ont vu également se développer les thématiques liées à la valorisation de la spécificité écologique de la forêt et des impacts du réchauffement climatique sur la végétation. Helmut Mayer présente un résumé de ces questions de recherches actuelles (MAYER, 2004, p.9) et il cite entre autres :

- **L'influence du changement climatique régional sur la croissance et la composition des forêts**
- La quantification des facteurs de stress climatiques pour les forêts
- Le bilan de CO₂ de la forêt en lien avec sa composition, sa dynamique de croissance
- Le bilan hydrologique de la forêt en dépendance de sa dynamique de croissance
- Le bilan énergétique de la forêt en dépendance de sa dynamique de croissance
- **Les dégâts liés à des situations météorologiques extrêmes (sécheresse, tempête,...)**
- **L'analyse quantitative du climat en forêt et l'influence des caractéristiques de la station**
- La quantification des fonctions de repos ou de protection contre des facteurs atmosphériques de stress

Notre recherche se situe à cheval entre les deux derniers points en étudiant l'influence du climat forestier sur le bien-être humain en période de stress thermique.

3.2.3. Quelques spécificités du climat en forêt

Quelles sont les particularités du climat à l'intérieur de la forêt ? Dans la partie suivante, nous aimerions résumer les connaissances acquises dans cette discipline.

Comme nous le dit GEIGER et. al. (2003, p. 263), la spécificité du climat de la forêt est principalement due au fait que la surface active, **c'est-à-dire la surface où a lieu l'absorption et la transformation de la plus grande partie de l'énergie radiative**, ne se situe pas à la hauteur du sol mais de la canopée. **C'est donc également à ce niveau plus élevé que l'on peut constater les extrêmes de température les plus marqués.** En outre, dans le cas de la forêt, **il faut parler plutôt d'une strate que d'une surface. Pour notre travail, ce sont les conditions climatiques à un niveau précis de cette strate qui nous intéressent, celui à la hauteur des êtres humains, c'est-à-dire le niveau des troncs.** Afin de comprendre le climat que l'on trouve à ce niveau précis, **il convient donc avant tout de comprendre l'effet modifiant de la canopée sur les différents paramètres météorologiques.** Nous allons commencer en exposant les connaissances générales concernant l'influence de la présence des arbres sur ces facteurs pour ensuite présenter des nuances constatées lors d'études comparatives de climat à couvert et à découvert.

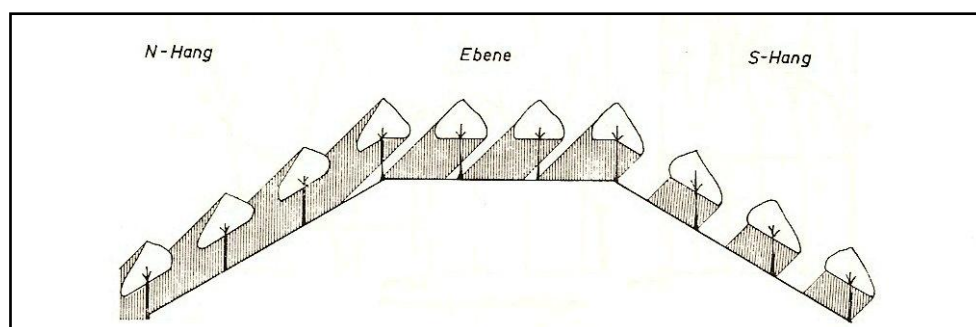
Premièrement, nous allons présenter un résumé du savoir concernant les modifications du rayonnement par la canopée et des particularités du vent pour ensuite passer aux spécificités de la température de l'air en forêt. En effet, celle-ci est déterminée d'une part par

la quantité d'énergie transformée en chaleur et d'une autre par la diffusion de cette chaleur par le vent. Finalement, nous examinerons le cas de l'humidité de l'air relative qui est étroitement liée à la température. Nous reviendrons plus en détail sur quelques éléments lors de l'analyse des paramètres météorologiques mesurés dans nos stations ainsi que des différences perçues entre elles.

Les chercheurs sont d'accord pour dire qu'un élément principal d'influence est la diminution du rayonnement solaire direct par les branches et par les feuilles ou les aiguilles, par le fait que ceux-ci reflètent et absorbent déjà une partie de l'énergie. Ainsi, pendant la journée, il y a moins d'énergie qui pénètre jusqu'au sol à l'intérieur de la forêt qu'à l'extérieur. Du fait de la présence abondante de biomasse, une grande partie du rayonnement est transformée en énergie métabolique au détriment entre autres de la chaleur. Inversément, pendant la nuit, les rayons à longues ondes émis par le sol ou par les plantes sont en partie reflétés par les arbres et ainsi empêchés de partir. De ce fait, la zone des troncs se refroidit moins pendant la nuit. Cependant, il existe de grandes différences entre les types de canopée, qui modifient différemment le climat sous couvert. Selon FLEMMING (1994, pp. 63 – 64.) un premier élément est la structure de la canopée. Les rayonnements passent plus facilement dans une forêt caractérisée par une faible densité que dans un fourré et ils sont diminués graduellement sur une distance plus grande si la forêt est composée de plusieurs couches que s'il s'agit d'une forêt monostrate (composée d'un seul type d'arbre avec le même âge). Un concept utilisé couramment pour examiner ceci est le LAI (Leaf Area Index) qui détermine la surface totale de feuilles observée en dessus d'une surface précise de sol. En d'autres termes il s'agit de déterminer combien de m^2 de surface végétale se trouve en-dessus d'un carré d' $1m^2$ de sol par exemple. Ensuite, toujours selon Flemming, le type d'arbres repertoriés joue également un rôle important. Premièrement, la régularité de la canopée en dépend : par exemple, dans une forêt de conifères caractérisée par une alternance entre cheminées (espaces d'air libre entre chaque cîme) et arbres, le degré de rayonnement au même niveau peut considérablement varier. Ceci s'observe moins dans une forêt de feuillus qui présente une structure plus homogène. Deuxièmement, les espèces héliophiles⁴ laissent passer plus de lumière que des espèces sciaphiles⁵. Cependant, cette diminution se montre généralement moins prononcée pour le rayonnement diffus ou pour le rayonnement à longues ondes.

Finalement, l'ombrage dû aux arbres n'est pas le même pour toutes les orientations comme le montre bien le schéma suivant présenté par Gerhard Mitscherlich :

Fig. 3.1. Présentation schématique de l'ombrage en pente et sur une plaine



G. Mitscherlich, 1981 : 76

⁴ Les espèces d'arbres héliophiles principales présentes en Suisse sont: les chênes, les espèces pionnières (pins, bouleaux, saules, aulnes etc.) et le mélèze.

⁵ Les espèces d'arbres sciaphiles principales présentes en Suisse sont: les espèces climaciques (hêtre, sapins, épicéa).

Avec une canopée identique, l'ombrage sur la pente orientée vers le sud est moins important que sur la plaine. **Le versant nord se trouve même complètement à l'ombre** (MITSCHERLICH, 1981. p. 76). Cette influence est pourtant moins marquée en été, la période qui nous intéresse le plus. (FLEMMING, 1994, p. 55)

Au sujet de l'influence de la forêt sur le vent, Mitscherlich souligne que la vitesse du vent est également fortement freinée par la friction avec les branches et les rameaux et non pas par les troncs (MITSCHERLICH, 1981, pp. 11 – 15). Ainsi, une forêt dont la strate arbustive est peu développée diminuera moins la vitesse du vent. Alors que la direction du vent est déviée par les troncs et les branches.

La quantité d'énergie radiative ainsi que la diffusion de la chaleur par les turbulences déterminent en partie la température de l'air. En forêt, comme nous l'avons vu, l'énergie radiative est relativement limitée et par conséquent il en est de même pour le réchauffement. Par contre, la mixité de l'air liée aux turbulences qui permet un certain refroidissement y est moindre. Comme le relève FLEMMING (1994, p. 72), la température **sous couvert forestier, dépendant de ces deux facteurs, est plus basse qu'à découvert si l'effet masquant de la canopée dépasse le manque de turbulence et c'est généralement le cas.** Cependant, elle peut être supérieure si la **diminution du refroidissement dû au vent n'est pas compensée** par une limitation suffisante du rayonnement. Les recherches de GRIMMOND et al. (2000) ont relevé des différences plus importantes entre la température sous couvert forestier et à découvert lorsque la température est élevée. Ceci est confirmée par Lee (LEE, 1978, p. 169) qui a observé ce phénomène plus particulièrement dans des forêts de feuillus. Cependant, des expériences dans des forêts méditerranéennes montrent que les températures mensuelles moyennes, dans des forêts arides de végétation xérophile, sont **légèrement plus élevées à couvert qu'au-dessus du terrain nu** (PAVARI, 1962).

L'humidité de l'air relative finalement est directement liée au niveau de la température. Selon LEE (1978, p.169) la **température généralement moins élevée en forêt est responsable d'une humidité relative plus élevée.** Ainsi, malgré un point de rosée et une humidité de l'air absolue comparable à ceux mesurés à découvert, la forêt paraît relativement plus humide. Ces résultats sont confirmés par AUSSENAC (2000). **Flemming ajoute que l'évaporation en forêt est plus importante que sur un champ ouvert du fait de la présence plus abondante de biomasse, contribuant ainsi au climat plus humide en forêt** (FLEMMING, 1994, p. 32).

Davies-Colley et al. résument bien ces constats généraux en disant que :

« The near-floor environment of the forest is very much shadier, much less windy, and fluctuates less markedly through the day in temperature and moisture than in the open. The forest is cooler and moister during the day and, to a lesser extent, warmer and drier at night. In a general way these characteristics of the forest microclimate are well known and common to both coniferous and broad-leaved forest from the boreal zone to the tropics. » (DAVIES-COLLEY, et. al., 2000. p. 118)

Cependant, des recherches plus récentes nous poussent à nuancer ces conclusions. Par exemple, il a été démontré que les différences entre couvert forestier et découvert sont plus accentuées lors de journées sans nébulosité. En effet, un ciel couvert diminue sensiblement les différences de température (DAVIES-COLLEY et. al., 2000, p.118 ; CARLSON et. al., 1995, p.323).

De plus, HOST et. al. (2000) ont montré que **l'influence de la topographie, notamment de l'exposition, du site sur le microclimat, prime sur l'influence de la structure forestière.** Ces résultats sont confirmés par GRIMMOND et al. (2000) qui ont constaté, lors de leur recherche concernant les différences climatiques **à l'intérieur d'une forêt au Indiana en 1995/96, que l'influence de la topographie a un impact plus important sur ces différences que la structure de la forêt une fois que les feuilles ont éclo.**

Finalement, MORECROFT et. al. (1997), entre autres, affirme que les différences de **température sont généralement restreintes, de l'ordre d'un degré Celsius, bien qu'on puisse constater certaines tendances dans les différences de microclimat.**

En conclusion, les analyses plus récentes permettent de nuancer l'idée initiale d'un climat nettement plus tempéré en forêt qu'à découvert. Cela vient d'une part du fait que – comme le soulignait Lützke – les premières recherches se sont souvent heurtées à des erreurs de mesure. D'autre part, les recherches s'étant multipliées et les méthodes ayant sensiblement progressé, il est évident que les résultats varient en fonction de cette diversité.

3.2.4. Lacunes

Comme nous avons pu voir dans la partie précédente, **il y a aujourd'hui une bonne connaissance du microclimat forestier et de nombreuses recherches ont été effectuées au sujet des différences climatiques à couvert et à découvert.** Cependant, il y a encore quelques lacunes dans la recherche. Ainsi, tant POTTER et. al. (2000) que MORECROFT et. al. (1997) **affirment qu'il existe encore très peu d'études sur les différences de microclimat** lors de périodes particulièrement chaudes ou particulièrement froides – un aspect important de notre travail sur la canicule 2003.

Il faut ajouter que ces études portent sur des périodes assez courtes qui dépassent rarement trois ans. Il sera donc intéressant, dans le cadre du travail de recherche de V. Renaud, **d'évaluer l'évolution de ces microclimats** sur une période plus longue.

3.3. LA BIOCLIMATOLOGIE HUMAINE

3.3.1. Introduction

Cette partie de notre travail est extrait de la synthèse de V.Renaud, dans le cadre de sa recherche.

Le temps et le climat conditionnent la santé humaine. L'organisme humain subit les effets d'événements météorologiques isolés, de situations transitoires typiques du climat local et de récurrences par saisons. La distinction entre climat et météo est ici déterminante. **La conception du climat est très ancienne puisqu'elle trouve son origine dans l'expérience** que chaque individu acquiert des conditions climatiques moyennes de son environnement. **Hippocrate fut le premier à mettre en relief les relations directes entre l'être humain et les éléments météorologiques.** Très justement, il rappelait déjà que le climat constitue une partie seulement de notre environnement atmosphérique. En effet, les sons, les odeurs et même le paysage jouent un rôle tout aussi important pour créer une combinaison de facteurs qui contribueront à notre bien-être ou au contraire qui peuvent perturber, plus ou moins gravement, notre équilibre interne.

La bioclimatologie et la biométéorologie humaines étudient l'influence du climat et des éléments météorologiques (température, humidité, vent, rayonnement et électricité atmosphérique) sur l'homme, en bonne santé ou malade, et sa capacité d'adaptation aux altérations de l'environnement atmosphérique. La biométéorologie et la bioclimatologie générales constituent la branche de l'écologie qui étudie les interrelations entre les facteurs chimiques et physiques de l'environnement atmosphérique et les organismes vivants. **Tout comme la biologie humaine n'est pas simplement une extension de la biologie animale, la biométéorologie humaine a un contenu et une orientation différents de la biométéorologie générale.** Cette distinction est justifiée par le développement de l'intellect et l'importance de l'aspect culturel chez l'être humain.

3.3.2. Les origines de la discipline

Malgré les préoccupations précoces des médecins grecs du V^{ème} siècle avant J.-C, le progrès des connaissances nécessaires pour la compréhension de la relation entre le climat et **l'organisme humain fut lent. Ainsi, jusqu'à la fin de l'époque moderne, un arrière-plan magico-astrologique imprégnait les conclusions des théories sur le climat et son influence sur notre santé.**

Les progrès en sciences naturelles et fondamentales de la fin du XVIII^{ème} permirent de **donner une base scientifique à l'étude des relations entre le climat et l'organisme et d'amorcer une transition entre l'empirisme séculaire et la recherche expérimentale.** Cette première phase du développement se distingue en France dans la grande enquête de la Société royale de médecine, puis par la rédaction de nombreuses topographies médicales comme les a nommé M.F. Ronfort, cité par BESANÇENOT (2001). Le mouvement colonial **(qui soulevait la question des possibilités d'adaptation de l'homme blanc sous les Tropiques) et l'habitude d'envoyer les patients fortunés dans des stations balnéaires ou de montagnes** (notamment les tuberculeux) stimulèrent **l'intérêt porté à la compréhension** des relations entre le climat et notre organisme. Mais les progrès de la thérapeutique et le discrédit progressif lié à la conception raciste du colonialisme plongèrent la bioclimatologie humaine dans une phase de repli,

« ignorée par la communauté scientifique qui lui reprochait de verser dans un déterminisme arrogant et simpliste (BESANÇENOT, 2001) ».

Deux ouvrages de référence sont à citer cependant pour cette période, celui de Sorre, intitulé « Les fondements bioclimatiques de la géographie humaine » (SORRE, 1943) ainsi que le manuel « Traité de climatologie biologique et médicale » de PIÉRY (1934).

3.3.3. Développement récent

La bioclimatologie ou biométéorologie humaine fut refondée sur de vraies bases méthodologiques en France, en Allemagne et aux USA à partir de la deuxième moitié du vingtième siècle. Il faut attendre que les deux disciplines directement concernées, médecine humaine et climatologie, soient stimulées par les progrès de ces dernières décennies. De **plus, outre l'aspect technologique, une autre évolution, culturelle celle-ci, contribua à créer un contexte propice au développement de cette discipline : premièrement, durant l'après-guerre, une nouvelle dimension culturelle et sociale du concept de santé apparaît. L'OMS transcrita cette conception de la manière suivante : « la santé est un état de bien-être complet, physique, mental et social, et non pas simplement l'absence de maladie ou d'infirmité ».** Deuxièmement, depuis la fin des années soixante, le nouveau concept **d'environnement et de qualité de vie induit par la prise de conscience écologique et par la remise en cause de la consommation de masse va donner un élan considérable à toutes les recherches sur les relations de l'homme et de la société avec l'environnement.**

Trois acteurs internationaux ont joué un rôle fondamental pour la relève de cette discipline **dont l'évolution dépendait de la collaboration entre les chercheurs en médecine et les services météorologiques : l'OMS, l'OMM et la Société Internationale de Bioclimatologie et Biométéorologie.** L'OMS, depuis sa création en 1944, encourage ces échanges sans lesquels **la compréhension de l'impact du climat sur l'être humain et ses capacités de réaction serait entravée.** L'OMM (Organisation mondiale de la météorologie) a créé un groupe de travail pour la bioclimatologie humaine. Elle a également placé parmi les grands thèmes de la Conférence mondiale du climat (Genève, 1979) celui des rapports entre climat et santé humaine dont la synthèse fut confiée à W.H. Weihe. Quant à la Société Internationale de Bioclimatologie et de Biométéorologie, fondée en 1956, elle a favorisé les échanges entre

chercheurs de différents pays grâce à des rencontres régulières entre scientifiques et à la **publication d'un périodique hautement qualifié : l'International Journal for Biometeorology.**

3.3.4. Notion de confort et de stress climatique

L'action du milieu atmosphérique sur l'organisme humain peut être distingué entre aspect physiologique et aspect pathologique, étant entendu que le second correspond au débordement du premier. Le corps humain est un système ouvert, doté d'une grande stabilité, en équilibre dynamique avec le climat et ses variations. Il existe une interaction continue entre la nature biologique de l'homme et les énergies du milieu environnant. Des échanges se font en permanence par l'intermédiaire de surfaces spécialisées, dont deux mettent l'organisme en contact direct avec l'air ambiant : la peau, représentant une surface d'environ 2m², et les alvéoles pulmonaires qui correspondent à 90m². Tous ces échanges, sous formes gazeuses et liquides, obéissent aux lois physiques qui régissent la matière et la vie.

Ce système ouvert présente une grande stabilité interne : C. Bernard fut le premier à **énoncer que les cellules réclament l'existence d'optima physiologiques, autour desquels les variations sont si faibles qu'on les qualifie de constantes** (BESANÇENOT, 2001, p.12). Cette propriété est appelée homéostasie et elle implique évidemment **le maintien d'une température corporelle stable.**

Notre capacité d'adaptation nous a permis de coloniser de nombreux bioclimats, notamment grâce à la construction de microclimats artificiels. Cependant, à l'origine, l'être humain est un homéotherme tropical ; c'est-à-dire que, comme tous les animaux à sang chaud, il doit maintenir sa température corporelle à une valeur constante, 36-37° en l'occurrence, par différents processus métaboliques dont la thermorégulation, qui, pour notre espèce, se fait dans les meilleures conditions au repos dans un milieu chaud. Le corps humain produit de la chaleur mais, tenu de se maintenir à une température constante, il doit sans cesse dissiper ses calories en excès. L'égalité entre gains et pertes constitue une zone de confort (ou d'optimum) bioclimatique, nommée zone de neutralité énergétique (BESANÇENOT, 2001, p.20). L'organisme n'ayant pas d'efforts particuliers à fournir pour maintenir l'homéothermie interne, cela se traduit par une sensation d'aise que ce soit lors du repos nocturne ou durant l'activité journalière. Les variations des échanges énergétiques, thermiques et hydriques, entre l'organisme et l'air ambiant, via le système respiratoire et la peau sont alors très faibles. Au contraire, le stress climatique correspond à un déséquilibre entre l'extérieur et l'intérieur de l'organisme, dû à des variations climatiques trop extrêmes ou au prolongement d'une situation défavorable. Ce déséquilibre peut se manifester par une sensation désagréable d'inconfort. Mais il peut également aller jusqu'aux limites de résistance de l'organisme et constituer un danger de mort. C'est le cas lors de déshydratation, d'hypothermie et d'hyperthermie.

La zone optimale de la température de l'air se situe entre 18° et 22° pour un homme normalement vêtu par un vent inférieur à 0.5 m/s, entre 30° et 34°C pour un homme nu dans les mêmes conditions. En dessous, l'organisme doit disposer de calories supplémentaires, en dessus, il doit les disperser.

3.3.5. Fondements et grandes lignes de recherches

Pour **ce chapitre, nous nous basons largement sur l'ouvrage rédigé par AGOSTINI (2005).** Nous avons vu que la motivation initiale de la bioclimatologie humaine se trouve dans la nécessité de comprendre les mécanismes selon lesquels les conditions atmosphériques interfèrent avec notre organisme et quelle est la réponse biologique de notre organisme. Il **s'agit bien sûr d'évaluer les effets exercés par chaque climat sur la santé de ceux qui y sont**

exposés brièvement (tourisme, voyages d'affaire), pour une période déterminée ou pour toute l'existence, mais également d'étudier les conséquences négatives des événements météorologiques extrêmes. Pour ce faire, les chercheurs (médecins, biologistes, géographes) utilisent des méthodes variées, propres à leurs disciplines.

Comme BESANCENOT (2001) le souligne, il est prématuré de dresser un bilan des différentes pistes concernées par la bioclimatologie humaine aujourd'hui, mais il est possible de reconnaître deux grands courants, visant à répondre respectivement aux questions « pourquoi ? » et « pourquoi là ? » : le premier relève des sciences de la vie. Il s'agit de comprendre les mécanismes biologiques liés à la réaction de l'organisme face aux variations climatiques. Les recherches portent fréquemment sur des individus d'exception (sportifs ou malades) et sur des lieux d'exception (microclimats artificiels, domaines aux limites de l'espace habitable : très hautes altitudes, très hautes latitudes, déserts...). Le second est géographique. Il s'agit d'interpoler les résultats obtenus par les biologistes, afin d'aboutir à la couverture aussi continue que possible d'un espace régional, à l'intérieur duquel on délimite des sous-ensembles relativement homogènes. Le qualificatif de géographique se justifie par l'approche synthétique, qui renonce à isoler un aspect du climat, et par la primauté accordée aux phénomènes collectifs sur les particularités individuelles, la tolérance d'un groupe humain au climat n'étant que la médiane des tolérances de chacun de ces membres (BESANÇENOT, 2001, p.6).

Ces deux courants se retrouvent à travers des filières médicales et la filière des bioclimats humains.

3.3.5.1. La climatopathologie et la climatothérapie : les filières médicales

L'influence du climat sur notre organisme peut être négative, entraînant des maladies ou même la mort, c'est l'objet de la climatopathologie. Il s'agit d'identifier le rapport direct des conditions atmosphériques moyennes ou d'épisodes météorologiques déterminé avec l'apparition, le maintien ou l'accentuation d'un état pathologique, ou d'une sensation d'inconfort. À l'inverse certaines ambiances climatiques sont favorables et même curatives, c'est le domaine de la climatothérapie. Or, les modalités d'action des variables atmosphériques sur l'organisme sont très complexes.

Les thèmes de la climatopathologie les plus couramment étudiés peuvent se résumer en deux types. Il s'agit d'un côté du lien entre le climat et les maladies infectieuses ou parasitaires comme par exemple la malaria ou la grippe. De l'autre côté, il y a les problématiques qui s'intéressent au lien entre climat et mortalité. C'est surtout cette deuxième thématique qui nous intéresse dans le cadre de notre recherche. La saisonnalité climatique ou des événements extrêmes sont à l'origine d'une augmentation de la mortalité comme ce fut le cas en 2003. On sait que dans les pays riches la mortalité s'est progressivement éloignée de la saison froide depuis la révolution industrielle, avec des fluctuations et des différences notables en fonction de la situation socio-économique de la population.

Les mécanismes par lesquels l'ambiance climatique agit positivement sur l'organisme ne sont pas encore connus dans le détail, c'est le cas notamment de l'électricité de l'air dont on ne connaît pas les variations. Par conséquent, il est impossible d'établir les conditions naturelles exactes nécessaires pour qu'un lieu soit défini « lieu de cure ». Les potentialités curatives d'une station climato thérapeutique, généralement située en montagne et au bord de la mer pour leurs effets stimulants ou relaxants, reposent généralement sur la garantie d'un air pur, sec, ensoleillé et modérément ventilé. Cela exclut évidemment les environs des grands centres urbains, les régions chaudes et humides et les surfaces trop exposées au vent. On verra plus loin quelles peuvent être les influences du climat et de l'environnement forestier sur notre organisme.

3.3.5.2. *Les bioclimats humains*

Il s'agit d'établir une définition des bioclimats humains, de les répartir en classes et de les cartographier de l'échelle locale à l'échelle globale. Cela implique une forte connexion avec la climatologie générale et les grandes classifications climatiques (Köppen, Thornwaithe) ainsi que l'utilisation des indices bioclimatiques, objet du présent chapitre. La méthode de base consiste à mettre en relation les mesures météorologiques d'une zone déterminée avec les indices, établis empiriquement comme nous le verrons. Trois difficultés principales se présentent à ce stade: tout d'abord, la disponibilité des mesures, dont les réseaux sont souvent trop larges et/ou incomplets, est souvent insuffisante. Il se pose ensuite le problème de la contestation d'une part des scientifiques de l'utilisation des indices bioclimatiques, critiqués pour leur empiricité et pour le manque de nuances des résultats du rapport homme - climat qu'ils produisent. Enfin, il n'y a pas de critère universel pour définir le niveau de détail selon lequel la classification et le regroupement des bioclimats devraient être réalisés. Trop de minutie ou au contraire trop de généralisation rendent inutile l'ensemble de la démarche.

3.4. L'ÉTÉ 2003

En parlant de l'été 2003, le terme 'canicule' apparaît dans une multitude de textes. Or, il faut souligner que ce terme n'est pas clairement défini (BESANÇENOT, 2002). Il y a unanimité pour dire qu'une canicule est un événement qui se caractérise à la fois par des températures exceptionnellement chaudes et par le fait qu'il ne se produit que rarement. Une des incertitudes principales résulte du choix entre une définition absolue et une définition relative de cet événement. La définition absolue fixe un même seuil pour l'ensemble d'un territoire en-dessus duquel on parle de canicule. Or, ceci consiste à dire que l'impact de la température sur l'organisme est le même partout, indépendamment du climat habituel. La définition relative par contre fixe des seuils particuliers qui varient selon la situation climatique locale et prend ainsi en considération la possibilité d'adaptation de la population. Ensuite, il y a d'autres facteurs qui peuvent être inclus dans la définition d'une vague de chaleur, tels que la durée des températures exceptionnelles, la température minimale qui permet ou non un certain soulagement pendant la nuit, l'influence de l'humidité de l'air, etc. L'influence de ces facteurs est analysée notamment à travers les indices bioclimatiques que nous avons introduits auparavant.

3.4.1. La situation météorologique

La situation météorologique en 2003 était exceptionnelle pour plusieurs raisons. Le rapport de MétéoSuisse nous présente un excellent résumé de cette période en Suisse (BADER, 2004), tandis que l'article de REBETEZ et. al. (2006) traite de la situation en Europe.

Tout d'abord, il faut mentionner les changements abrupts de température enregistrés en Suisse et en Europe centrale et occidentale en général. Ces changements extrêmes des températures sont caractéristiques des régimes climatiques continentaux et donc atypiques pour cette région dont le climat est normalement dominé par l'influence atlantique (BADER, 2004, p. 7). Ainsi, certains mois de l'année 2003, tels que avril ou octobre étaient particulièrement froids, tandis que pendant les mois de mai, juin et août les températures étaient anormalement élevées. En outre, le changement de saison entre l'hiver et l'été et vice versa s'est passé en quelques semaines. Ainsi, en avril, des minima en dessous de 0 °C étaient mesurés, tandis qu'au début du mois de mai pour certains jours les maxima dépassaient déjà les 30 °C.

L'année 2003 s'est également caractérisée par une sécheresse marquée, non seulement pendant les mois particulièrement chauds de l'été, mais déjà à partir du mois de février. Comme nous l'avons vu dans la partie consacrée à la microclimatologie, un manque d'eau peut renforcer des températures élevées, du fait que peu d'énergie est utilisée pour l'évaporation et peut donc également être transformée en énergie thermique. REBETEZ et. al. (2006) ajoutent que suite au déficit de précipitations et aux températures élevées, l'humidité de l'air relative était également en-dessous des conditions moyennes et ceci non seulement pendant l'été, mais également pendant la plupart du reste de l'année.

L'événement le plus remarquable, et celui qui nous intéresse plus spécialement pour notre travail, était les périodes de canicule de juin et surtout d'août. BADER (2004) nous rappelle que juin et août étaient marqués par un anticyclone situé en-dessus de l'Europe centrale qui déviait l'air frais et humide vers le nord. REBETEZ et. al. (2006) constatent que la canicule se serait probablement produite même sans cette situation météorologique particulière, car il s'agissait d'une combinaison entre le réchauffement climatique général et la situation de pression atmosphérique de l'été 2003. La région concernée en Europe se situe entre l'Espagne, la Hongrie, l'Islande et la Grèce avec des températures spécialement élevées pour le mois d'août dans le sud-ouest de l'Allemagne, dans l'est de la France et dans l'ouest de la Suisse (REBETEZ et. al. 2006). C'est dans cette région également que l'on peut constater les plus grandes déviations de la durée d'ensoleillement comparé à la période 1996 – 2002. Une particularité en Suisse, selon le rapport de MétéoSuisse, était la présence régulière de bise, causée par un flux général orienté vers l'est, tandis que des situations de canicule dans cette région sont souvent liées à la présence de vents depuis le sud-ouest. L'été 2003 détient un ensemble de records. Ainsi, juin et août 2003 ont été les deux mois les plus chauds en Suisse depuis le début des mesures météorologiques en 1864. La moyenne des températures mesurées entre juin et août dépassait de 4.0 °C à 5.5 °C les moyennes normales d'autres étés. En plus, un nouveau record de température maximale a été mesuré en Suisse avec 41.5 °C le 11 Août à Grono au Misox.

Quelle est la part des facteurs anthropogènes dans la multiplication de périodes de canicule ? Telle est la question que se posent STOTT, STONE et ALLEN (2004). Bien que le changement climatique soit un processus très complexe et que l'on peut rarement identifier des causes simples, les auteurs tentent d'estimer la part des facteurs générés par l'homme dans l'augmentation du risque de rencontrer des périodes qui dépassent de façon extraordinaire la température moyenne de la période de référence depuis 1900. Pour ce faire, ils comparent des modélisations du climat une première fois en incluant les facteurs anthropogènes et une deuxième fois en utilisant uniquement les facteurs naturels avec les mesures effectivement observées. Ils déduisent de leur recherche que les facteurs anthropogènes sont responsables pour au moins 50% de l'augmentation du risque de canicules.

3.4.2. Ses implications sanitaires

Quels sont les impacts sanitaires de ces vagues de chaleur ? (Voir aussi avec chapitre bioclimatologie) Généralement, il est admis que les périodes particulièrement chaudes ont une influence négative sur la santé. Il existe une multitude d'articles qui traitent l'influence des vagues de chaleur sur la mortalité (DESSAI, 2002 ; DESSAI, 2003 ; BESANÇENOT, 2002 ; EL-ZEIN et. al., 2004 ; SMOYER-TOMIC et. al., 2003 ; DONALDSON et. al., 2003 ; FOUILLET et. al., 2005 ; NAUGHTON et. al., 2002 ; KYSELÝ, 2004 ; GRITZE et. al. 2005 ; CONTI et. al. 2004) et qui arrivent tous à la conclusion que les vagues de chaleur sont responsables d'une certaine surmortalité. Ainsi, les décès en excès pour l'été 2003 sont estimés à 35'000 personnes (United Nations Environment Programme, cité par Z'GRAGGEN, 2006). Cependant, quelques auteurs avancent l'« effet de moisson » afin de relativiser ce nombre élevé de décès. C'est-à-dire qu'un grand nombre de ces décès seraient dus à la fragilité de ceux qui seraient morts peu après, même sans l'impact de la canicule (VALLERON

et al., 2004, FOUILLET et. al.). Leurs conclusions sont très diverses : Valleron et Boumendil **constatent un effet de moisson assez important, Fouillet et. al. par contre n'ont pas pu** observer cet effet et BESANÇENOT (2001) **démontre qu'il n'en est rien**. Alors que la surmortalité est le sujet de maintes recherches, **très peu est connu sur l'impact** sanitaire en **général. Citons, par exemple, l'analyse de DOLNEY et SHERIDAN (2005) sur la relation entre des températures élevées et les appels d'urgence** dans laquelle les auteurs montrent une augmentation des malaises pendant les jours particulièrement chauds. Il faut cependant **souligner que les recherches traitant de l'influence des vagues de chaleur sur le bien-être** se heurtent à la difficulté de trouver des données adéquates en dehors de la morbidité ou de la mortalité qui permettent des analyses quantitatives.

Enfin, les diverses recherches ont montré que toute la population n'est pas affectée de la même manière par les températures exceptionnellement élevées. Différentes analyses, notamment celle de NAUGHTON et. al. (2002) sur la vague de chaleur à Chicago en 1999 **ont permis d'identifier certains facteurs qui augmentent le risque de mortalité. Ainsi, ils ont** constaté une surmortalité importante parmi les personnes âgées, les personnes qui souffrent de maladies cardiovasculaires ou de maladies psychiques, la population de faible niveau socio-économique, ceux qui vivent seuls, qui ne quittent que rarement leur appartement ou **dont l'appartement se situe à l'étage supérieur.**

D'autre part, les recherches sur les aires urbaines de pays post-industrialisés indiquent, sans surprise, une plus grande vulnérabilité des populations pauvres face aux extrêmes climatiques. Cette distribution est à retenir lorsqu'il s'agit de rechercher des corrélations entre des indispositions et des malaises spécifiques liés aux fluctuations du temps ou aux conditions moyennes du climat.

4. SYSTÈME D'HYPOTHÈSES

Après avoir présenté un bilan des connaissances ainsi que le cadre théorique et afin de pouvoir répondre à notre question de départ, c'est-à-dire de voir si le microclimat de la forêt peut avoir un effet bénéfique sur le bien-être humain pendant des périodes de canicule, nous allons formuler les hypothèses suivantes :

1. Le microclimat dans la forêt est plus tempéré que le climat en dehors de la forêt.
2. La différence entre ces deux endroits est plus prononcée pendant les périodes particulièrement chaudes.
3. Le climat tempéré de la forêt a un effet potentiel positif sur le bien-être humain pendant les périodes particulièrement chaudes.

Dans la partie suivante, nous verrons plus en détail les méthodes qui seront choisies ainsi que les données qui seront utilisées afin de pouvoir tester ces hypothèses.

DEUXIEME PARTIE

DONNEES ET METHODES

Cette partie sera consacrée à la description de notre terrain de recherche (c'est-à-dire des stations de mesure pour les données météorologiques), à la présentation des instruments de mesure utilisés, aux données que nous avons obtenues **ainsi qu'aux méthodes choisies pour leur analyse.**

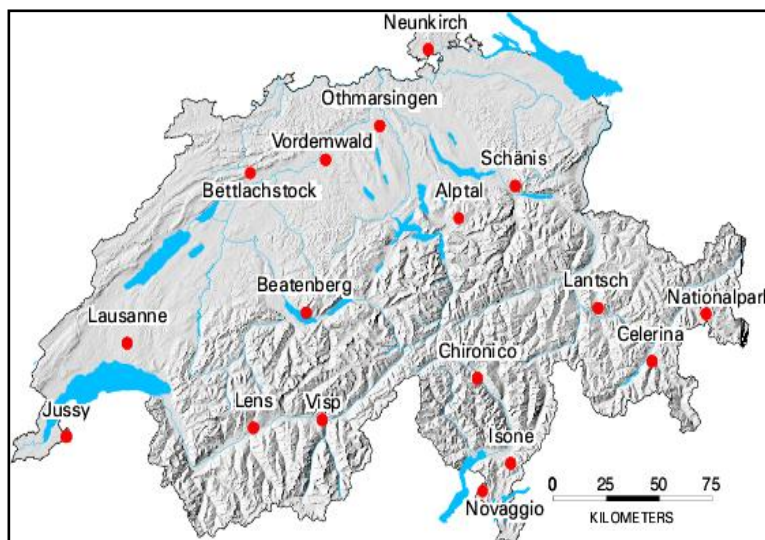
5. DESCRIPTION DU TERRAIN

Dans le cadre de la recherche du LWF, des stations de mesures ont été installées en 17 lieux du territoire suisse. Une station à double mesure y a été placée, c'est-à-dire à chaque fois **une station en forêt et une en dehors de la forêt.** L'emplacement de ces deux stations de mesures, celle sous couvert forestier et celle à découvert, a été choisi de manière à limiter au maximum les différences pour les paramètres autres que le couvert végétal, tels que **l'altitude, l'exposition ou la pente.** Il s'agit des stations de **Beatenberg, Bettlachstock, Celerina, Chironico, Isonne, Jussy, Lausanne, Parc National, Neunkirch, Novaggio, Othmarsingen, Schänis, Viège et Vordemwald.** Pour les trois autres sites, c'est-à-dire **Alpthal, Lantsch et Lens, les données pour l'été 2003 ne sont pas** à disposition pour une des deux stations de mesure, soit celle sous couvert forestier, soit celle à découvert ou même pour les deux dans le cas de Lantsch.

5.1. LES STATIONS DE MESURE ET LEURS CARACTÉRISTIQUES

La carte suivante montre l'emplacement des différentes stations de mesure du projet LWF. Les informations concernant les caractéristiques des stations ainsi que la carte se trouvent sur le site Internet du WSL.⁶

Fig. 5.1. Les stations de mesures LWF



Source : www.wsl.ch

Les deux stations de mesure à Beatenberg se situent dans les préalpes bernoises à une altitude entre 1490m et 1532m sur un versant exposé sud-ouest et incliné en moyenne de 33%. La station sous couvert se trouve dans une pessière **densité de 412 arbres d'un diamètre égal ou supérieur à 12 cm par hectare.**

Le site de Bettlachstock, dans le canton de Soleure, se situe sur l'arc jurassien entre 1101m et 1196m d'altitude sur un versant orienté au sud avec une inclinaison moyenne de 66%.

⁶(http://www.wsl.ch/wald/abteilungen/risks/forschungsflaechen_en.php)

Nous y retrouvons une forêt mixte où prédomine les feuillus, le hêtre en tête, mais où nous trouvons également quelques sapins. La densité y est de 464 arbres par hectare.

À Celerina, dans les Grisons, les stations se situent à une altitude entre 1846 et 1896 m sur une pente exposée vers le nord-est et inclinée de 34% en moyenne. La forêt y est composée **d'aroles et dispose d'une** densité de 234 arbres par hectare.

Le site tessinois de Chironico se trouve à une altitude entre 1342 et 1387m sur un versant nord incliné de 35% en moyenne. La station sous couvert forestier est située dans une pessière-sapinière. Nous y retrouvons 376 arbres par hectare.

À Isonne, également au Tessin, les deux stations de mesure sont situées à une altitude entre 1181 et 1259 m sur une pente orientée vers le nord-est et inclinée de 58% en moyenne. Il **s'agit d'une hêtraie d'une** densité de 603 arbres par hectare.

Les deux stations de mesure à Jussy, dans le canton de Genève, se retrouvent à une altitude **entre 496 et 506m sur un site de plaine (inclinaison de 3%). Il s'agit d'une forêt de feuillus** mixte composée de chênes surtout, mais aussi de charmes et de peupliers. La densité est de 622 arbres par hectare.

Le site de Lausanne se trouve à une altitude de 800 à 814 m sur un versant nord-est incliné de 7% en moyenne. La forêt y est composée de hêtres avant tout, mais aussi de sapins et **d'épicéas** et la densité est de 320 arbres par hectare.

Dans le Parc National, aux Grisons, les stations de mesure se trouvent à une altitude entre 1890 et 1907 m sur un versant orienté au sud et incliné de 11% en moyenne. Le site sous couvert se situe dans une forêt composée de pins à crochet avec une densité de 1228 arbres par hectare.

À Neunkirch, situé sur l'arc jurassien dans le canton de Schaffhouse, les stations de mesures sont situées à une altitude entre 554 et 609 m sur un versant orienté vers le nord et incliné de 58% en moyenne. On y trouve une hêtraie mixte avec des érables et des tilleuls. La densité est de 222 arbres par hectare.

Le site de Novaggio, dans le Tessin, se situe à une altitude entre 902 et 997 m sur un versant sud incliné de 68% en moyenne. La station de mesure sous couvert se trouve dans une forêt de feuillues mixte composée surtout de chênes, mais également de châtaigniers et de bouleaux et qui se caractérise par une densité de 658 arbres par hectare.

Les deux stations de mesure à Othmarsingen, dans le canton d'Argovie, se trouvent à une altitude entre 467 et 500 m sur un versant sud incliné de 27% en moyenne. La forêt y est composée surtout de hêtres mais aussi de tilleuls et la densité est de 154 arbres par hectare.

À Schänis, situées dans les préalpes saint-galloises, les stations de mesure se situent à une **altitude entre 693 et 773 m sur une pente orientée vers l'est et inclinée de 60% en** moyenne. On y trouve une forêt mixte, composée avant tout de hêtres, mais également de sapins et de frênes. La densité y est de 300 arbres par hectare.

Le site de Viège se trouve à une altitude entre 657 et 733 m sur un versant nord incliné de 80% en moyenne. La station sous couvert se situe dans une forêt composée de pins sylvestres à une densité de 275 arbres par hectare.

Enfin, à Vordemwald, situées **dans le canton d'Argovie, les stations se situent à une altitude** entre 473 et 487 m sur un versant nord-ouest incliné de 14% en moyenne. Nous y trouvons une forêt mixte où prédomine le sapin mais où il y a également des chênes. La densité y est de 536 arbres par hectare.

Un résumé de ces caractéristiques se trouve dans l'Annexe 1.

5.2. LES RÉGIONS BIOGÉOGRAPHIQUES ET LES ÉTAGES DE VÉGÉTATION

La distribution des types de végétation est déterminée par plusieurs facteurs tant naturels (climat, sol, etc.) que culturels (influence anthropogène, histoire, etc.). En tenant compte de ces facteurs, une surface peut être divisée au plan horizontal en plusieurs régions biogéographiques et au plan vertical en divers étages de végétation. En Suisse, nous distinguons six régions biogéographiques qui sont le Jura, le Plateau, les Préalpes et le versant nord des Alpes, les Alpes internes occidentales (Valais), les Alpes internes orientales (Grisons) ainsi que les Alpes du sud (Tessin). Les étages de végétation sont déterminés par l'altitude. On distingue avant tout les étages collinéen, montagnard et sub-alpin qui sont centraux pour notre travail. (Communication personnelle Valentine Renaud ; REBETEZ, REINHARD, BUTTLER, 2004)

Afin de systématiser nos stations d'observation, nous les avons classées en fonction de ces deux critères. Le tableau suivant donne un résumé de nos résultats :

Fig. 5.2. Les stations en fonction des régions biogéographiques et des étages de végétation

| | Jura | Plateau | Préalpes | Valais | Grisons | Tessin |
|-------------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Collinéen | <i>300 – 700 m</i> | | | <i>300 – 800m</i> | | <i>300-900m</i> |
| | Neunkirch | Jussy Vordemwald Othmarsingen | | Viège | | |
| Montagnard | <i>700 – 1500m</i> | <i>700 – 1300</i> | | <i>800/900 – 1600m</i> | | |
| | Bettlachstock | Lausanne | Schänis | | | Chironico Isonne Novaggio |
| Sub-alpin | <i>1500–1800m</i> | <i>1300 – 1800m</i> | | <i>1600 – 2400m</i> | | <i>1600-2000m</i> |
| | | | Beatenberg | | Celerina Nationalpark | |

V. Renaud, projet de thèse en cours

Nous pouvons constater que nous ne disposons pas d'une station de mesure pour chaque catégorie alors que pour d'autres plusieurs stations correspondent au même classement. Par exemple nous n'avons pas de station située à l'étage collinéen au Tessin, alors que nous en avons trois pour l'étage collinéen sur le plateau. Il est cependant évident que certaines combinaisons n'existent pas en réalité telles que l'étage sub-alpin dans la région biogéographique du plateau.

6. LES INSTRUMENTS DE MESURES

A chacun des sites décrits ci-dessus sont installées des stations de mesures à couvert et à découvert qui enregistrent différents paramètres météorologiques. Il s'agit de mesures de la température, de l'humidité de l'air, du vent, de la précipitation et du rayonnement. Ces stations ainsi que l'exactitude de leur fonctionnement sont décrits par Rebetez et Logeay dans un rapport LWF de janvier 2000 (REBETEZ et LOGEAY, 2000). Le thermomètre des stations de mesure est situé à une hauteur de 2 mètres du sol et est placé à l'intérieur d'un abri circulaire en métal. Dans ce même abri se trouve également le capteur d'humidité relative qui n'est pas aéré mécaniquement. L'anémomètre et la girouette pour mesurer la

vitesse et la direction du vent sont situés aux deux extrémités d'une tige métallique horizontale, fixée à une hauteur de 4,6m du sol. L'anémomètre consiste en trois cônes d'aluminium qui tournent sur un plan horizontal autour d'un petit mât. Le rayonnement est mesuré par un pyranomètre de forme cylindrique, situé à une hauteur de 3 mètres. L'étude de REBETEZ et LOGEAY (2000) a démontré que, malgré quelques décalages, les mesures des stations du WSL sont comparables aux mesures prises par les instruments de MétéoSuisse à part pour celles de la vitesse du vent qui sont inférieures à celles de MétéoSuisse.

7. DESCRIPTION DES DONNÉES

7.1. LES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES

Pour chaque station, nous disposons de la mesure de la température maximale et minimale entre minuit et minuit ainsi que de la moyenne journalière. Les mesures sont prises toutes les 10 minutes, ce qui correspond à 144 mesures par jour. La température est mesurée en °C.

Les mesures de l'humidité de l'air relative (en %) sont relevées une fois par heure, ce qui correspond à 24 mesures par jour. Nous avons retenu les mesures de l'humidité de l'air relative minimale, maximale ainsi que de la moyenne journalière. De plus, pour calculer les indices bioclimatiques, nous avons travaillé avec les mesures de l'humidité de l'air prises au moment de la température maximale.

La vitesse du vent a été enregistrée toutes les dix minutes, ce qui donne 144 mesures par jour et par station. Nous avons retenu les mesures de la vitesse du vent maximale et de la vitesse du vent minimale par jour ainsi que les moyennes calculées sur la totalité des mesures. La vitesse du vent est indiquée en m/s et nous ne disposons pas des indications sur la direction du vent.

Pour ce qui est du rayonnement, nous avons travaillé avec les mesures du PAR (*Photosynthetically Active Radiation*), la part du spectre de la lumière solaire qui peut être utilisée par les plantes pour la photosynthèse. Le PAR correspond approximativement à la lumière visible ou à 50% du rayonnement globale. Le PAR est mesuré en W/m². Cette mesure a également été prise toutes les 10 minutes pour un total de 144 mesures par jour et par station. Là aussi, nous disposons des mesures des minima, des maxima ainsi que de la moyenne journalière.

7.2. FIABILITÉ DES DONNÉES

Nous ne disposons pas de toutes les données pour les 14 stations, comme nous le verrons dans ce chapitre. Pour certaines journées, les mesures ne sont pas du tout disponibles. **En outre, afin d'assurer l'exactitude de nos résultats, nous n'avons pris en compte ni les moyennes ni les extrêmes (maxima et minima) indiqués à partir d'un nombre de mesures trop faibles. Nous avons estimé que la qualité n'était pas assurée lorsque plus de 20% environ des mesures d'une même journée manquaient. Il est probable que l'origine de ces lacunes proviennent de problèmes de transmission des données plutôt que d'une défaillance technique des instruments car souvent, pour les différents paramètres, les mêmes journées sont concernées par station. Ainsi, en faisant abstraction de ces mesures manquantes ou éliminées, comment se présente la situation dans les 14 sites pour les différents paramètres météorologiques ?**

Dans le cas des températures, nous disposons de près de 90% des mesures entre le 1^{er} avril 2003 et le 31 octobre 2003 pour toutes les stations sauf pour à Othmarsingen où la qualité des données est un peu moins bonne (78.04%). Il existe des techniques **d'extrapolation de données climatiques** manquantes à partir des mesures disponibles (XIA et. al., 1999), mais **nous avons renoncé à procéder à cette opération dans le cadre du présent travail parce qu'il nous semble que le pourcentage de données disponibles est suffisant.**

Pour les données de l'humidité de l'air relative, la situation est un peu meilleure. En effet, pour 12 stations, nous disposons de plus de 90% des données pour la période entre le 1^{er} avril et le 31 octobre. **C'est à Schänis que nous manquent le plus d'informations** mais même là, nous disposons de 86.92% des données.

La qualité des mesures de la vitesse du vent est en général comparable à celle des autres paramètres et les données sont donc généralement utilisables pour plus de 90% des journées. Cependant, les mesures de la vitesse du vent à Isonne dans la station à découvert sont de 0 pour **quasiment toutes les journées tandis qu'en forêt** du vent a été enregistré. **Il nous semble que ceci ne peut être que dû à une erreur de mesure et nous n'avons donc pas pris en compte les mesures de cette station.**

Les données concernant le PAR (*Photosynthetically Active Radiation*) sont elles aussi comparables à celles des autres paramètres pour ce qui est de leur qualité. Nous disposons donc là également des mesures pour un pourcentage généralement plus élevé que 90% des journées entre le 1^{er} avril 2003 et le 31 octobre 2003.

Nous avons vu que l'on estime le PAR à 50% du rayonnement global, il faut donc ajouter que cette mesure nous donne des indications vagues sur le rayonnement global en écartant notamment le rayonnement UV et infrarouge. **Du fait qu'il s'agit uniquement d'estimations, nous ne pouvons pas tirer de conclusions générales concernant l'influence du rayonnement,** notamment sur la température à partir des observations du PAR. Cependant, en gardant à **l'esprit cette réserve, les mesures** du PAR pourront nous aider à comprendre certains aspects **des particularités dans les profils de température, notamment par rapport à l'influence jouée par l'éclosion des feuilles au printemps sur les différences climatiques entre la forêt et un champ ouvert.** **Nous ne serons cependant pas en mesure d'inclure le rayonnement global dans le calcul des indices bioclimatiques.**

De plus, du fait que les minima enregistrés pour le PAR sont ceux observés pendant la nuit, **il est évident qu'ils sont quasiment identiques** en forêt et en dehors de la forêt. Pour cette raison, nous nous limitons aux analyses faites à partir des mesures des maxima ainsi que des moyennes journalières.

En outre, il faut ajouter que dans l'emplacement des stations de mesure, afin de pouvoir limiter la variation pour les autres paramètres que la couverture forestière, certains compromis ont dû être faits. Ainsi, plusieurs stations de mesure pour le découvert sont situées dans des clairières. Or, les ouvrages de microclimatologie forestière soulignent que le climat dans des clairières est souvent plus extrême que celui **d'un champ ouvert, parce qu'on y retrouve un rayonnement comparable à celui d'un champ, mais la vitesse du vent y est souvent réduite et la chaleur ne peut donc pas y être dissipée aussi facilement.**

Il faut également souligner que notre échantillon provient de 14 stations uniquement. **Nos résultats nous permettent d'en déduire des tendances et de proposer des tentatives d'interprétation, mais l'échantillon est trop petit pour pouvoir** en tirer des explications générales. Ainsi, nous comptons par exemple six stations dominées par le hêtre, une espèce sciaphile mais uniquement deux stations caractérisées par des forêts de chêne, une espèce héliophile. Seulement une station se trouve sur **un terrain plat et nous n'avons aucune station avec une pente orientée vers l'est notamment.**

Finalement, tenant compte de notre hypothèse qui stipule que le climat en forêt est plus **tempéré que le climat en dehors de la forêt, l'utilisation de la mesure de la moyenne** peut se

révéler problématique pour la température ainsi que pour l'humidité de l'air relative. Ainsi, la moyenne calculée pour la station à découvert avec des mesures des maxima plus élevés et des minima plus bas peut être similaire à la moyenne calculée pour la station à couvert avec des mesures des extrêmes plus tempérés comme nous le dit LÜTZKE (1961). Il nous paraît donc indiqué de travailler avant tout avec les mesures des maxima et des minima pour ces deux paramètres.

En résumé, nous **pouvons constater que nos données concernant la température, l'humidité de l'air, la vitesse du vent ainsi que le rayonnement sont de bonne qualité malgré les** quelques problèmes relevés ci-dessus. De plus, les caractéristiques des différentes stations nous permettent de détecter des tendances et de proposer des interprétations mais il faudra une certaine prudence vis-à-vis de conclusions trop généralisantes.

8. LES MÉTHODES

8.1. LA COMPARAISON DES CLIMATS

Afin de comparer les différences climatiques entre une forêt et un champ ouvert, diverses **méthodes quantitatives seront utilisées. Tout d'abord, nous avons calculé les moyennes à** différentes échelles temporelles pour les mesures des paramètres météorologiques. De cette façon, nous pouvons par exemple constater les différences entre la moyenne des maxima de température sous couvert forestier et à découvert pour la période de juin à août 2003.

Dans le but de vérifier le niveau de significativité de ces différences, nous avons opté pour un test non-paramétrique étant donné que la distribution **de nos données n'étant pas tout à fait normale. Nous avons décidé d'utiliser le test élaboré par Mann et Whitney, un test de** rang qui permet de déterminer si deux échantillons A et B sont identiques ou non. Dans **notre cas, il s'agit d'un côté des paramètres météorologiques mesurés sous couvert forestier et d'un autre côté des mesures à découvert. Ce test est souvent présenté comme étant un** homologue du test Wilcoxon. Ce qui distingue ces deux tests est que le premier est adapté aux données indépendantes, tandis que le deuxième compare des données dépendantes. En choisissant Mann-Whitney, nous vérifions donc si la différence globale entre les mesures à couvert et à découvert est différente et non pas la différence par journée. Dans le cas de ce travail, les deux étaient adaptés. Cependant, les deux tests sont souvent présentés comme équivalents et une comparaison entre les résultats des deux tests pour les maxima de température des différentes stations a confirmé que le niveau de significativité était identique dans les deux cas. Nous avons en plus utilisé le coefficient de détermination R^2 pour examiner le degré de variance **d'une variable lorsqu'une deuxième variable change.**

Nous avons ensuite élaboré une grille d'analyse qui nous permet de mettre en lien les différents résultats des tests statistiques mentionnés ci-dessus avec les caractéristiques des **stations de mesures tels que l'altitude du site, la densité de la forêt, les espèces d'arbres** dominants, etc. (Annexe 1) En effet le type de végétation est lui-même déterminé en partie par le type de sol, de roche ainsi que du climat. Celui-ci serait donc plutôt un indicateur des conditions qui vont elles-mêmes influencer les différences entre la forêt et le terrain nu. Dans le texte, nous avons uniquement retenu les caractéristiques qui nous semblent importantes **pour l'analyse, mais la grille complète se trouve chaque fois en annexe.**

Les conclusions tirées de ces deux tests ont été complétées par l'interprétation de différents graphiques qui ont été élaborés sur Excel.

8.2. LES INDICES BIOCLIMATIQUES

8.2.1. Introduction

Cette partie de notre travail est extrait de la synthèse de V.Renaud, dans le cadre de sa recherche.

Pour exprimer la réaction de l'organisme face à l'ambiance thermique, il faut utiliser des méthodes qui permettent de considérer ensemble les différents paramètres (température de l'air, humidité, vent et rayonnement) car ceux-ci agissent simultanément, l'influence de chacun dépendant du niveau des autres. Les indices bioclimatiques permettent de traduire ces combinaisons.

« Il en existe des centaines, qui diffèrent par leur base expérimentale, par les systèmes d'unités utilisés, par leur domaine d'application, par les paramètres pris en compte et par le poids relatif attribué à chacun d'eux ou à leur interdépendance. Certaines formules reposent sur des critères subjectifs, difficilement quantifiables, comme la sensation de confort d'un individu supposé moyen. D'autres offrent des garanties d'objectivité, qu'elles soient fondées sur des tests physiologiques (fréquence cardiaque, émission de sueur) ou qu'elles partent de la mesure de grandeurs physiques (à l'aide de dispositifs instrumentaux sensibles à un ou plusieurs facteurs de l'ambiance et dont on fait des modèles de l'organisme humain) (BESANÇENOT, 2001, p.32).»

Ces différences n'excluent pas le rôle prépondérant de la température de l'air. Les indices sont ainsi répartis par type d'association d'un ou de plusieurs paramètres avec la mesure de la température, dont les plus usités sont ceux de la vitesse du vent et de l'humidité de l'air.

Ainsi, les combinaisons de la température et du vent sont nécessaires pour mesurer la résistance de notre organisme au froid. Mais nous allons nous limiter ici à la présentation des deux modèles qui mesurent la combinaison de la température de l'air et de l'humidité relative, le rôle réfrigérant du vent étant tout à fait secondaire dans le contexte de l'été caniculaire de 2003. Ce que les résultats à disposition concernant la mesure du vent dans les 14 sites d'observation ont confirmé.

8.2.2. Le complexe thermo-hygrométrique et la température effective

L'humidité ambiante conditionne le maintien de l'homéothermie. L'organisme, pour conserver sa température interne à une valeur stable, doit éliminer les calories produites en excès par son métabolisme. Pour cela, il dispose au niveau cutané du mécanisme de la sudation qui lui permet d'évaporer les calories excédentaires par l'excrétion de quantité plus ou moins importante d'eau par ses 4 millions de glandes sudorales: le passage de la sueur à l'état gazeux dans l'air implique de l'énergie pour rompre les liaisons d'hydrogènes. L'efficacité de ce processus est aussi fonction de la quantité d'eau présente dans l'atmosphère. En cas de saturation de l'air ambiant, la sueur ruisselle sans s'évaporer, donc sans entraîner de déperdition calorifique, avec le risque pour l'organisme de s'échauffer.

On voit donc que l'état hygrométrique de l'air ne peut à lui seul expliquer la diversité des réactions et des sensations physiologiques. L'étude des températures ne peut en être dissociée. Nous avons tous éprouvé l'effet d'un taux élevé d'humidité relative associé à une température élevée, entraînant une poussée de sueur sur tout le corps. Or, la même valeur hygrométrique à plus basse température, ou inversement, la même température dans un air sec, ne nous perturbe pas. De même, un froid intense additionné d'une forte humidité nous

donne **la sensation d'un bain glacé**. On comprend ainsi que la chaleur et le froid sont **ressentis avec plus d'effets à mesure que l'humidité de l'air croît**.

Il est pourtant très difficile de reproduire cette interrelation par une grandeur physique tant **l'organisme est complexe**. **C'est le but des indices thermo-hygrométriques**, dont nous donnons deux exemples ici et qui nous serviront à évaluer les conditions de confort en forêt pendant la canicule de 2003.

Ces indices, aussi nombreux que les chercheurs qui se sont penchés sur cette question, sont **construits sur des critères subjectifs**. **C'est-à-dire sur les sensations qu'un échantillon de sujets a ressenties**.

8.2.3. Le THI (Temperature Humidity Index)

BESANÇENOT (2001, pp. 44-47) consacre tout un chapitre à cet indice. Le THI a été inventé par Thom **en 1959 dans le but d'interpréter le confort estival aux Etats-Unis** et dans les pays de climat, peuplement et niveau de vie comparables. Cet indice a été introduit dans le Bulletin météorologique américain officiel.

L'équation de Thom est la suivante :

$$\text{THI} = t^{\circ} - [(0.55 - 0.0055 U \%) (t^{\circ} - 14.4)]$$

Où t° désigne la température [°C] et $U\%$ l'humidité relative.

Le champ d'application du THI n'est pas illimité : GIVONI (1978) signale que la relation entre l'indice obtenu et les réactions biologiques ou sensorielles **n'est pas linéaire**. **Le passage d'un THI de 17 à 19 est à peine perçu par l'organisme alors que de 31 à 33 on franchit la limite du supportable**. BESANÇENOT (2001) **en conclut qu'on ne peut déduire la nocivité d'un changement de conditions climatiques en fonction de la seule amplitude de variation de l'indice mais également en fonction de sa valeur absolue**. **il faut éviter de l'utiliser avec des basses températures** (cette limite est fixée à partir de $-1,7^{\circ}\text{C}$ ou $+1,7^{\circ}\text{C}$ par TERJUNG (1967, pp. 227 – 228) ainsi que par DURAND-DASTES (1969, p. 90), car, au froid, la tension de vapeur saturante devient si faible qu'un écart thermique infime suffit à entraîner des variations considérables de l'humidité relative. **Il ne peut donc être utilisé pour les très hautes latitudes et altitudes**. Par contre, il a été démontré, notamment par GREGORCZUK et CENA (1967) que la formule de Thom permet une approche correcte du complexe thermo-hygrométrique en toute saison et sur toutes les autres latitudes.

Ainsi la zone de confort correspond à l'intervalle 15,0 <THI >19,9. Les indices inférieurs à 15 provoquent une sensation désagréable de fraîcheur, puis de froid de plus en plus vif. **À l'inverse, à partir de 26,5 la chaleur est perçue de plus en plus négativement**. **À 30 et plus, la productivité est fortement diminuée et les désordres pathologiques connaissent une forte recrudescence**.

Fig. 8.1. Les différentes classes du THI selon E.C. Thom, en °C

| | |
|-------------|----------------------|
| Torrïde | THI = 30,0 °C |
| Très chaude | 26,5 ≤ THI <29,9 °C |
| Chaude | 20,0 ≤ THI <26,4 °C |
| Confortable | 15,0 ≤ THI <19,9 °C |
| Fraïche | 13,0 ≤ THI <14,9 °C |
| Froïde | -1,7 ≤ THI <12,9 °C |
| Très froïde | -9,9 < THI ≤ -1,7 °C |

V. Renaud, projet de thèse en cours

8.2.4. L'indice Humidex

Utilisé couramment par le bulletin météorologique canadien pour prévenir la population des risques liés à la chaleur, cet indice a été développé dans les années soixante par les météorologues canadiens et plus particulièrement à partir des travaux de MASTERSON et RICHARDSON (1979). Pour que la formule ci-dessous fonctionne, il faut donner la température du point de rosée en kelvins (température en kelvins = température en °C + 273,1). Le nombre 5417,7530 est une constante approximative, basée sur la masse molaire de l'eau, la chaleur latente d'évaporation et la constante universelle des gaz.

Humidex = (température de l'air) + h

$h = 0,5555 (e - 10)$

$e =$ pression de vapeur en hPa (=mbar = 0,1 kPa), donnée par :

$e = 6,11 * \exp [5417,7530 * ((1/273,16) - (1/\text{point de rosée}))]$, où exp représente la fonction exponentielle en base naturelle.

Fig. 8.2. Les différentes classes d'HUMIDEX

| | |
|-----------------|--|
| Valeur Humidex | Degré de confort |
| Moins de 29 | Aucun inconfort |
| 30 à 39 | Un certain inconfort |
| 40 à 45 | Beaucoup d'inconfort : évitez les efforts |
| Au-dessus de 45 | Danger |
| Au-dessus de 54 | Coup de chaleur imminent |

J.M. Masterson et F.A. Richardson, Environment Canada

Il faut noter que les valeurs associées à l'inconfort de l'Humidex sont normalement pour l'extérieur et que sa relation avec une sensation de bien-être est subjective. Elle varie largement selon les individus.

Avant de tirer toute **conclusion des résultats obtenus par l'utilisation** de tels indices, il faut **encore savoir que l'impression d'étouffement ressentie en cas de température effective élevée provient non seulement des difficultés pour l'organisme de lutter contre**

l'échauffement par la peau mais également de l'effort requis pour régulariser les échanges hydriques au niveau des alvéoles pulmonaires et éviter le risque de dilution du sang.

De la même manière, il est important de garder à l'esprit la difficulté d'isoler l'influence directe du climat des autres effets du milieu ambiant et de l'état du « sujet ». Le bien-être ressenti en plein air ne dépend pas seulement du confort thermique mais aussi de la lumière, des sons, des odeurs et du paysage, soit l'ensemble du milieu lui-même. En cela, ces indices ne peuvent que fournir des indications très utiles par exemple pour fixer des normes à respecter dans le cadre des conditions de travail, ou pour prévenir des gelures ou des coups de chaleur, mais ils ne peuvent correspondre à la réalité de ce que l'on ressent. C'est que la frontière entre le domaine physiologique et psychologique est mince et que l'ambiance atmosphérique influence tout autant le psychisme et l'humeur. En effet, l'équilibre neuro-végétatif dépend aussi des changements de l'ambiance atmosphérique. Par exemple, en influençant la production d'hormones, ou directement par l'effet des variations du champ électrique de l'atmosphère et l'ionisation de l'air.

Pour conclure, on peut déduire de ce présent chapitre, que

« le splendide isolement que nous revendiquons à l'égard des forces de la nature reste relatif, une grande part de notre psychisme, et de notre physique, demeurant sous l'emprise d'un déterminisme implacable (BESANÇENOT, 1991, p. 64) ».

TROISIEME PARTIE

RESULTATS ET DISCUSSION

9. LES RÉSULTATS : PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES

9.1. LE RAYONNEMENT (PAR)

9.1.1. Introduction

Avant d'exposer nos résultats, il nous semble nécessaire de répéter ici les réserves émises précédemment (chap. 7.2.) vis-à-vis des mesures du PAR. En effet, **le PAR n'étant qu'une partie spécifique du rayonnement global estimé à 50%, ces mesures ne nous permettent pas de pleinement comprendre l'influence du rayonnement sur les paramètres météorologiques et surtout l'effet qu'y joue la présence du couvert forestier. Pour cette raison, il s'agit avant tout dans ce chapitre de dresser quelques tendances qui pourront être complétées par une analyse incluant d'autres paramètres tels que LAI.**

Pour commencer, nous chercherons à constater une différence dans le niveau du PAR sous couvert forestier et à découvert et nous nous intéresserons aux variabilités entre les différentes stations. Pour ce faire, nous avons déterminé quel pourcentage du PAR enregistré **en dehors de la forêt peut être mesuré à l'intérieur de celle-ci. En d'autres termes, il s'agit de voir quelle part de la lumière est filtrée par les arbres. Ensuite, nous traiterons plus en détail l'influence éventuelle de l'éclosion des feuilles sur le niveau de PAR qui peut pénétrer jusqu'au sol. Dans le chapitre suivant, consacré aux mesures de la température, nous verrons s'il existe une corrélation entre le PAR mesuré et les températures observées dans un même site en mettant en lien les maxima de ces deux paramètres.**

Il est important de mentionner que nous avons écarté la station de Novaggio pour les observations concernant le PAR. En fait, nous avons pu constater que la station de mesure à **découvert n'a enregistré qu'une fraction du rayonnement mesuré en dehors de la forêt aux autres stations. Cette anomalie est probablement due au fait que cette station de mesure se situe dans une clairière et qu'elle se trouve donc partiellement à l'abri des rayons solaires.** Ceci pourrait également expliquer le profil particulier des différences de température sous couvert forestier et à découvert que nous allons présenter dans le chapitre suivant.

Il faut également émettre quelques réserves vis-à-vis des mesures prises à Celerina où le rayonnement en forêt dépasse celui mesuré en dehors de la forêt pour la moyenne des mesures des maxima entre avril et octobre. Cependant, du fait que le niveau de PAR **enregistré à découvert est comparable aux niveaux observés dans d'autres stations, il nous paraît justifié de retenir tout de même les mesures pour Celerina tout en sachant que les mesures à couvert pourraient être surestimées.** De plus, comme nous le verrons au cours de ce chapitre, nous pouvons trouver une situation comparable à Viège et au Parc National avec des taux de luminosité très peu réduits sous couvert forestier.

9.1.2. Importance de l'écart entre couvert et découvert

Tout d'abord, il faut noter que le pourcentage du PAR enregistré en dehors de la forêt qui atteint la station de mesure sous couvert est généralement plus important pour les maxima que pour les moyennes. En effet, pour la grande majorité des stations, plus du 90% du PAR de la moyenne journalière est retenu par les arbres tandis que ce chiffre se situe entre 70% et 90% pour les maxima.

En examinant les résultats de la période entre juin et août, nous pouvons constater plusieurs profils. La distinction la plus frappante concerne les stations de Celerina, du Parc National et de Viège. Comparé aux autres sites, le niveau de PAR mesuré sous couvert forestier est

nettement plus important que celui trouvé ailleurs. Pour les moyennes il est d'un peu moins de la moitié tandis que pour les maxima il se situe à plus des 2/3 des mesures enregistrées à découvert. Parmi les autres stations, nous pouvons observer une légère distinction entre les caractéristiques trouvées pour les moyennes et celles trouvées pour les maxima. Tandis que les 11 stations présentent des mesures similaires pour les moyennes, les deux stations de Chironico et de Neunkirch ressortent légèrement avec des pourcentages plus importants pour les maxima. Le tableau ainsi que les trois graphiques suivants illustrent ces observations.

Le tableau ci-dessous reproduit les stations triées selon l'importance du pourcentage de PAR observé en forêt pour les moyennes et pour les maxima observés entre juin et août 2003. Celui-ci est exprimé en fonction de la quantité de PAR de la station à découvert correspondante, considérée comme les 100%.

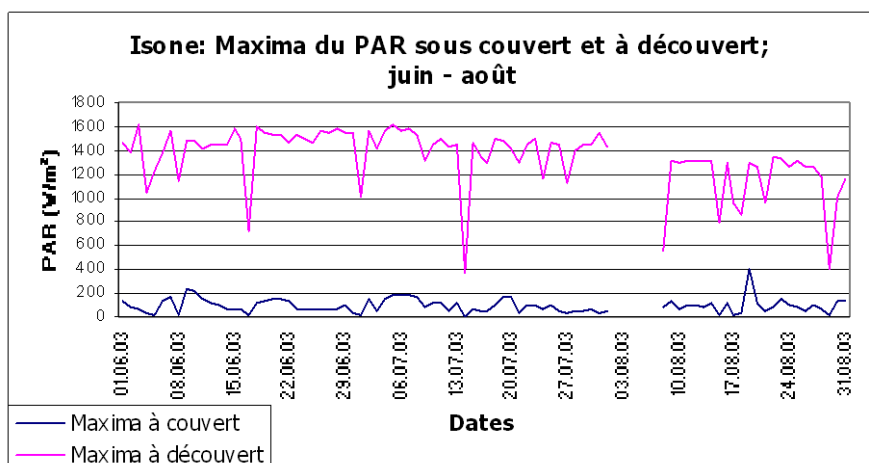
Fig. 9.1. Différence couvert - découvert du PAR pour les moyennes et les maxima (% , juin - août 2003)

| Moyennes % du PAR à couvert comparé au découvert | | Maxima % du PAR à couvert comparé au découvert | |
|---|---------------|---|---------------|
| 1.27 | Lausanne | 7.16 | Isonne |
| 1.59 | Isonne | 10.91 | Schänis |
| 1.81 | Jussy | 11.66 | Jussy |
| 2.45 | Bettlachstock | 12.43 | Bettlachstock |
| 2.56 | Vordemwald | 13.92 | Lausanne |
| 2.73 | Schänis | 15.92 | Vordemwald |
| 3.50 | Othmarsingen | 16.92 | Othmarsingen |
| 4.64 | Neunkirch | 19.18 | Beatenberg |
| 5.84 | Beatenberg | | |
| 6.81 | Chironico | 32.05 | Chironico |
| | | 32.49 | Neunkirch |
| 40.78 | Celerina | | |
| 47.87 | Nationalpark | 84.27 | Viège |
| 51.10 | Viège | 84.84 | Nationalpark |
| | | 101.49 | Celerina |

Source : Données LWF

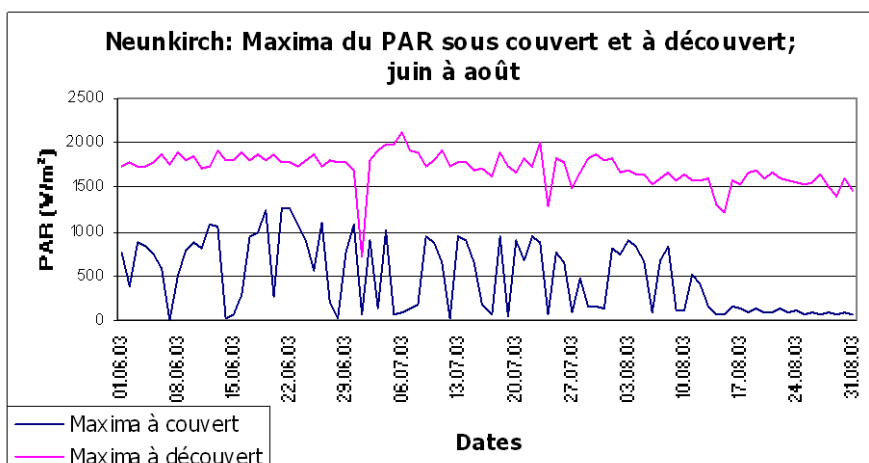
Les trois graphiques suivants montrent chacun un exemple des trois types que nous pouvons observer parmi les résultats des maxima entre juin et août : Celerina pour une station où la situation à découvert est similaire à celle sous couvert forestier, Isonne où la luminosité sous couvert forestier est largement réduite et Neunkirch, qui se situe entre ces deux extrêmes.

Fig. 9.2. Maxima du PAR sous couvert et à découvert à Isonne (juin -août 2003)



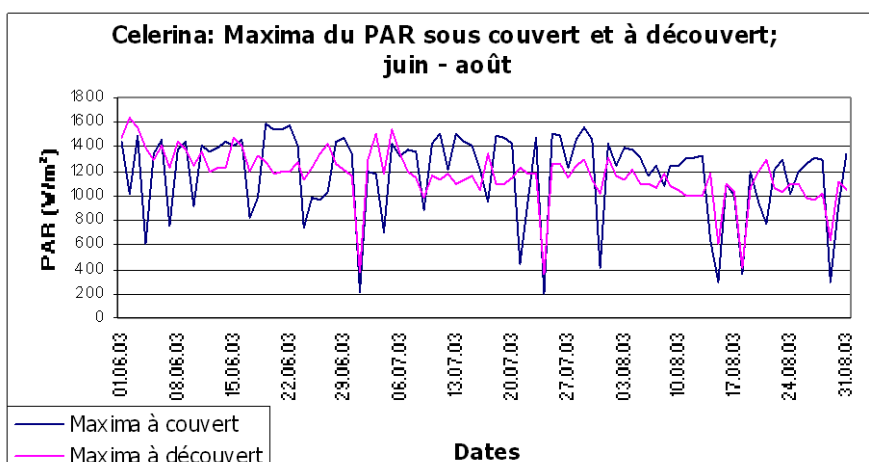
Source : Données LWF

Fig. 9.3. Maxima du PAR sous couvert et à découvert à Neunkirch (juin - août 2003)



Source : Données LWF

Fig. 9.4. Maxima du PAR sous couvert et à découvert à Celerina (juin - août 2003)



Source : Données LWF

En comparant les résultats obtenus pour les trois mois estivaux à ceux de la période d'avril à octobre, nous pouvons constater que les tendances observées ci-dessus sont amoindries en incluant le printemps et l'automne. Pendant cette période, une partie moins importante du

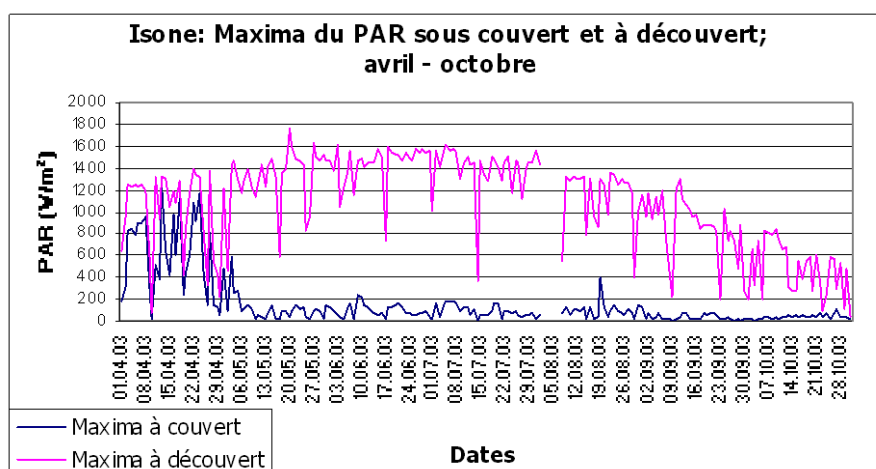
rayonnement est empêchée de passer, ce qui pourrait être attribué à l'absence des feuilles. C'est par ce point que nous aimerions commencer la discussion de nos résultats.

9.1.3. Discussion et conclusion

9.1.3.1. L'effet des feuilles

Nos résultats nous permettent effectivement d'observer une distinction nette en comparant le taux de luminosité observé dans une forêt de feuillus en avril à celui observé entre juin et août. Prenons l'exemple d'Isonne. Le graphique suivant, montrant le niveau de PAR sous couvert forestier et à découvert, rend bien visible l'influence de l'éclosion des feuilles sur ce paramètre.

Fig. 9.5. Maxima du PAR sous couvert et à découvert à Isonne (avril - octobre 2003)



Source : Données LWF

Ce fait est encore plus impressionnant en comparant la partie du PAR mesuré à découvert qui atteint la station de mesure sous couvert forestier pendant ces deux périodes distinctes.

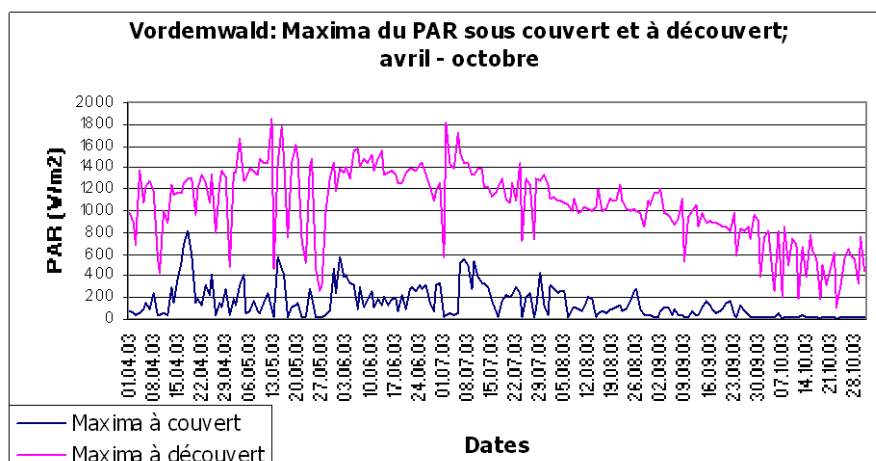
Fig. 9.6. Différence couvert – découvert du PAR pour les moyennes et les maxima à Isonne. (% , juin - août 2003 et avril 2003)

| | Maxima | | Moyennes | |
|--------|-------------|---------|-------------|---------|
| | Juin à Août | à Avril | Juin à Août | à Avril |
| Isonne | 7.16% | 62.04% | 1.59% | 39.19% |

Source : Données LWF

A l'exception de la station de Neunkirch, cette distinction nette entre le mois d'avril et les trois mois estivaux se confirme pour les autres forêts de feuillus.

Par contre, si nous examinons une station située dans une forêt de conifères, comme par exemple Vordemwald, où l'espèce dominante est le sapin - pourtant mélangé avec des chênes – nous pouvons constater que les différences entre la forêt et le champ ouvert restent perceptibles pendant toute la période.

Fig. 9.7. Maxima du PAR sous couvert et à découvert à Vordemwald (avril - octobre 2003)

Source : Données LWF

Les deux graphiques montrés ci-dessus permettent également d'observer des différences sur l'échelle temporelle au niveau du PAR enregistré à découvert, différences qui découlent de l'intensité solaire plus prononcée pendant l'été. Et nous pouvons constater que les différences moins marquées en automne sont avant tout dues à cette réduction dans l'intensité du rayonnement solaire enregistré à découvert et non pas à une augmentation du niveau de PAR sous couvert forestier du fait d'une densité moins importante de la forêt suite à la tombée des feuilles.

9.1.3.2. L'influence des caractéristiques de la station

Un deuxième point que nous pouvons observer dans nos résultats est le rôle que jouent les différentes espèces d'arbres. Ce qui est le plus frappant est la distinction entre les stations de Viège, du Parc National et de Celerina comparée aux autres stations d'observation. Ces trois sites, qui se distinguent par un pourcentage nettement plus élevé de PAR qui peut pénétrer jusqu'au sol, se caractérisent tous par une forêt de pin (arole à Celerina, pin sylvestre à Viège et pin de montagne au Parc National).

Concernant les autres stations, les observations sont plus ambiguës. Dans le tableau 9.1., nous pouvons détecter que les forêts de feuillus ont tendance à retenir une plus grande partie du rayonnement que le font les forêts de conifères. Cependant, contrairement au pin, les différences entre les taux de luminosité qui peuvent atteindre les stations de mesure sous couvert forestier ne sont que très peu prononcées et il est donc impossible d'en tirer des conclusions générales concernant l'influence des espèces d'arbres. Il est pourtant assez surprenant que nous ne pouvons pas voir de différence entre les forêts de hêtre, qui est une espèce sciaphile et les forêts de chêne, qui est une espèce héliophile. On aurait pu s'attendre à un taux de luminosité plus élevé dans une forêt composée de chênes que dans une forêt de hêtre. Il faut pourtant relever qu'il nous reste uniquement une forêt de chêne dans notre échantillon du fait que nous n'avons pas pris en compte la station de Novaggio. Cette forêt se trouve à Jussy et elle se caractérise par une densité relativement forte comparée aux autres stations (1240 arbres sur deux hectares). Il est donc bien possible que cette absence de tendance visible soit due au nombre restreint de notre échantillon.

Finalement, comme nous l'avons mentionné, nous pouvons observer des pourcentages plus importants pour les mesures des maxima que pour celles de moyennes. Il est plausible que cela soit dû au fait que des brèches dans la canopée laissent passer plus de rayonnement et que donc les maxima sous couvert forestier seront observés lors de ces occasions. C'est également ce phénomène de taches de lumière qui pourrait expliquer le profil particulier de

Neunkirch et Chironico qui ont des taux de luminosité bien plus élevés pour les maxima que les autres stations sans pour autant atteindre les résultats des trois stations avec des forêts **de pin. D'autant plus que cette spécificité ne peut être observée que pour les maxima et non pas pour les moyennes.**

Tous ces éléments sont réunis en Annexe 2 à 5.

9.2. LA TEMPÉRATURE

Rappelons que la situation climatique pendant l'été 2003 s'est distinguée en Suisse comme dans le reste de l'Europe par des températures nettement au-dessus de la norme tant pour les extrêmes que pour les moyennes. Ceci notamment pendant la dernière semaine de juin et plus particulièrement pendant les deux premières semaines du mois d'août, où les températures ont atteint leur paroxysme.

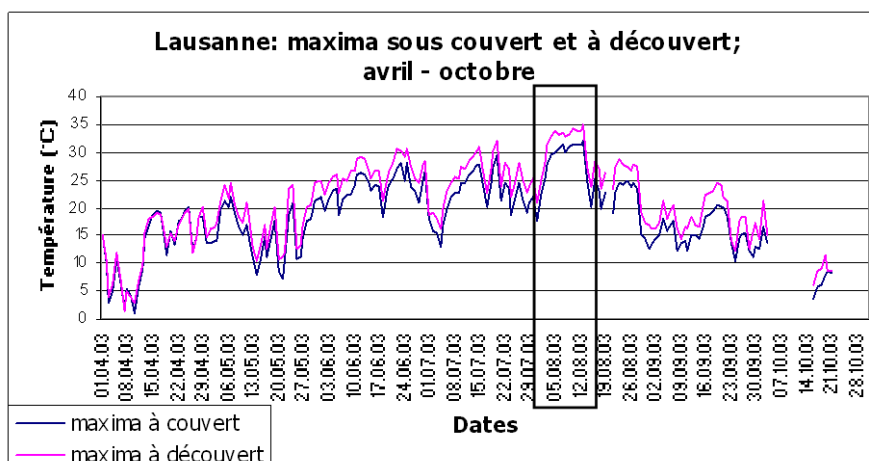
9.2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous aimerions nous concentrer sur les températures à couvert et à découvert. **Comme nous en avons fait l'hypothèse**, nous rechercherons une différence réelle **de température entre le site de mesure sous couvert forestier et celui à découvert. Il s'agira** de vérifier également si ces différences sont significatives ou si elles peuvent être dus au hasard. Ensuite, nous examinerons deux possibilités de corrélation : **tout d'abord entre la** température et le PAR, ensuite entre la température mesurée à découvert et la différence entre les deux stations de **mesure afin de relever une influence due à l'intensité de la** température. Finalement, nous analyserons plus en détail les spécificités de ces différences pour terminer avec quelques interprétations de nos résultats.

Comme nous l'avons énoncé dans la partie consacrée aux méthodes ainsi que dans la **présentation de nos données**, nous avons fait le choix de laisser de côté l'analyse des moyennes journalières pour les raisons suivantes : **d'une part, les mesures des maxima et des minima de températures sont généralement de bonne qualité et d'autre part les moyennes ne fournissent qu'une information limitée sur la situation climatique.** Nous avons donc mis l'accent sur l'analyse des extrêmes au détriment des moyennes.

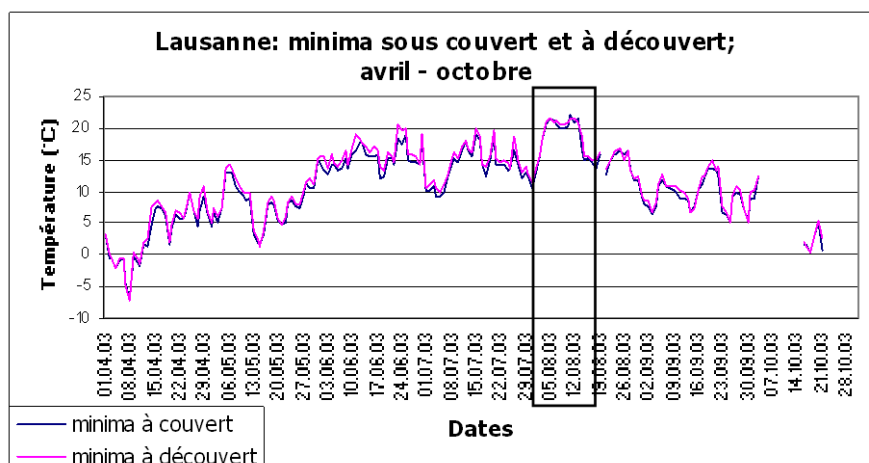
Comme première observation, on voit sur toutes les illustrations des maxima de température **et dans une moindre mesure sur ceux des minima, que les premières journées d'août, qui** étaient particulièrement chaudes, ressortent très clairement. Nous prenons ici comme exemple la situation de Lausanne où cette période ressort bien tant pour les minima que pour les maxima.

Fig. 9.8. Maxima de température sous couvert et à découvert à Lausanne (avril et octobre 2003)



Source : Données LWF

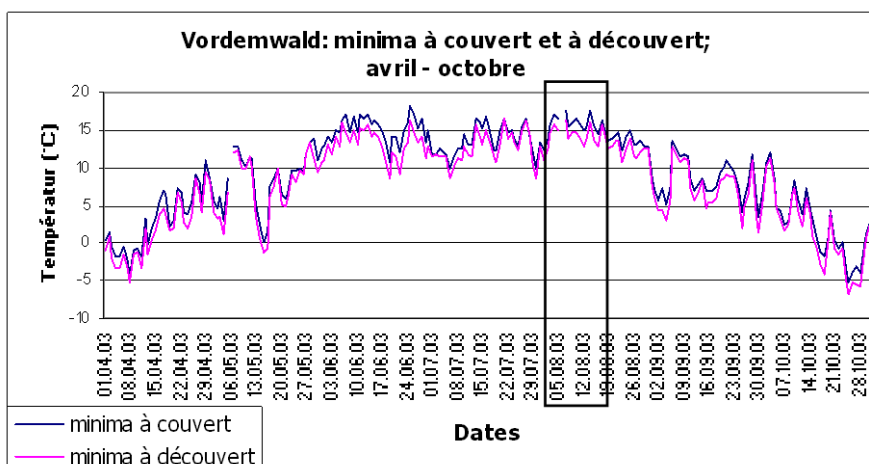
Fig. 9.9. Minima de température sous couvert et à découvert à Lausanne (avril et octobre 2003)



Source : Données LWF

Dans d'autres stations, cela ressort moins distinctement pour les minima comme c'est le cas à Vordemwald :

Fig. 9.10. Minima de température sous couvert et à découvert à Vordemwald (avril et octobre 2003)



Source : Données LWF

9.2.2. Importance de l'écart entre couvert et découvert

9.2.2.1. Les maxima

En ce qui concerne les maxima de température, nous avons posé l'hypothèse que ceux-ci seraient moins élevés en forêt qu'en dehors de la forêt. Nous avons pu constater que c'est le cas dans 13 sites sur 14. Le site du Parc National représente une exception avec des maxima plus élevés à couvert qu'à découvert. Cependant, si nous nous limitons aux trois mois d'été, la station de Viège présente également cette particularité. Ceci dit, ces différences entre les moyennes des maxima à couvert et à découvert pour ces deux stations restent inférieures à 1°C.

Comme on peut le constater d'après le tableau ci-dessous, la différence la plus importante entre la moyenne des maxima à couvert et à découvert a été mesurée pour la période d'avril à octobre à Othmarsingen et s'élève à -3.93°C, suivi par Schänis avec -3.75°C de différence. Pour les trois mois de juin, juillet et août, les différences les plus importantes se trouvent aux mêmes stations, mais elles sont là de -4.8°C pour Othmarsingen et de -4.72°C pour Schänis.

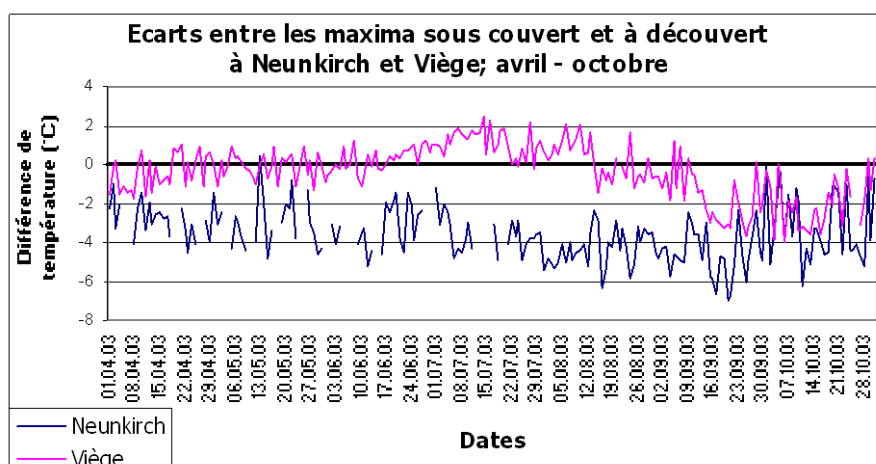
Fig. 9.11. Les écarts les plus prononcés pour les maxima de température

| Station | Couvert – Découvert (°C) | |
|--------------|--------------------------|-------------|
| | Avril à Octobre | Juin à Août |
| Othmarsingen | -3.93 | -4.8 |
| Schänis | -3.75 | -4.72 |

Source : Données LWF

Pour ces deux stations, nous pouvons constater des différences entre les moyennes des maxima à couvert et à découvert plus élevées pour les trois mois d'été que pour la période entre avril et octobre. Cette tendance se confirme également pour la majorité des autres stations de mesure, les seules exceptions étant Beatenberg, Celerina et Chironico. A Schänis, la différence mesurée pour les trois mois d'été dépasse de 1°C celle de la période plus longue. Il faut cependant noter que pour cette station nous ne disposons pas des mesures entre le 28 juin 2003 et le 25 juillet 2003 et qu'il faut donc interpréter ces résultats avec prudence. Ce point est intéressant dans le contexte de notre deuxième hypothèse à savoir que les différences entre les deux mesures sont plus élevées lorsqu'il fait particulièrement chaud.

Dans le graphique suivant, nous avons voulu illustrer cette diversité des différences entre les températures à couvert et à découvert selon les sites concernés. Pour ce faire, nous avons choisi la station de Viège, qui présente une situation inverse et extrême, et celle de Neunkirch dont la qualité des données est optimale pour représenter au mieux l'importance de l'écart entre les maxima de température à couvert et à découvert (il y a un relativement grand nombre de journées pour lesquelles les mesures sont manquantes à Othmarsingen et à Schänis).

Fig. 9.12. Comparaison des maxima de température sous couvert et à découvert à Neunkirch et à Viège

Source : Données LWF

En termes absolus, la moyenne des maxima la plus élevée pour la période d'avril à octobre a été mesurée à Viège dans la station à découvert (23.7°C), suivi par la station à découvert d'Othmarsingen (23.46°C). En troisième position, nous trouvons la station à couvert de Viège (23.34°C). Pour la période de juin à août, les maxima les plus élevés en moyenne ont été enregistrés à Othmarsingen à découvert (30.98°C), suivi par la station en forêt à Viège (30.21°C) et par la station de Jussy à découvert (30.13°C). Le cas de Viège est assez remarquable. Non seulement cette station présente une exception du fait que les maxima y sont plus élevés à couvert qu'à découvert pour la période de juin à août, mais de plus la moyenne des maxima sous couvert forestier de cette station se situe parmi les moyennes les plus élevées de toutes nos stations d'observation.

La moyenne des maxima la plus basse pour la période d'avril à octobre est celle de Beatenberg (13.62°C), suivie de celle mesurée à Chironico (13.89°C) et à Celerina (14.04°C). Beatenberg a également connu la moyenne des maxima la plus basse pendant les trois mois d'été (20.04°C), cette fois suivi par la moyenne mesurée à Celerina (20.15) et à Chironico (20.38°C) (Annexe 6).

Fig. 9.13. Hiérarchie des maxima pour avril à octobre et pour juin à août

| Station | Maxima en °C (Avril – Octobre) |
|-------------------------|-----------------------------------|
| Viège, découvert | 23.7 |
| Othmarsingen, découvert | 23.46 |
| Viège, couvert | 23.34 |
| (...) | (...) |
| Celerina, couvert | 14.04 |
| Chironico, couvert | 13.89 |
| Beatenberg, couvert | 13.62 |

| Station | Maxima en °C (Juin – Août) |
|-------------------------|-------------------------------|
| Othmarsingen, découvert | 30.98 |
| Viège, couvert | 30.21 |
| Jussy, découvert | 30.13 |
| (...) | (...) |
| Chironico, couvert | 20.38 |
| Celerina, couvert | 20.15 |
| Beatenberg, couvert | 20.04 |

Source : Données LWF

9.2.2.2. Les minima

Notre hypothèse stipule que les minima en forêt sont moins bas que les minima à découvert. **Nos résultats montrent que c'est en général le cas, bien que cela soit moins net que pour les maxima.** En effet, pour les minima, il y a quatre stations qui ne correspondent pas à notre hypothèse et où la température minimale est plus basse en forêt qu'à découvert : Bettlachstock, Isonne, Lausanne et le Parc National. De plus, les différences entre couvert et découvert sont globalement moins importantes qu'elles ne le sont pour les maxima.

Ainsi, comme nous le voyons sur la figure suivante, pour la période entre avril et octobre, la différence la plus élevée entre la moyenne des minima à couvert et à découvert a été mesurée à Celerina et elle est de 3°C. Elle est suivie par Viège où la différence entre les moyennes **des minima était de l'ordre de 1.67°C. Le résultat le moins prononcé se trouve à Isonne** avec une différence entre couvert et découvert de -0,08°C. Pour la période de juin, juillet et août, les mêmes deux stations sont en tête avec 3.4°C à Celerina et 2.05°C à Viège. En dernière position, nous trouvons Bettlachstock avec -0.14°C de différence. Comme nous avons pu le constater pour les maxima, la différence entre les deux moyennes est en général **plus importante pendant les trois mois d'été**, sauf pour les stations de Beatenberg et de Novaggio.

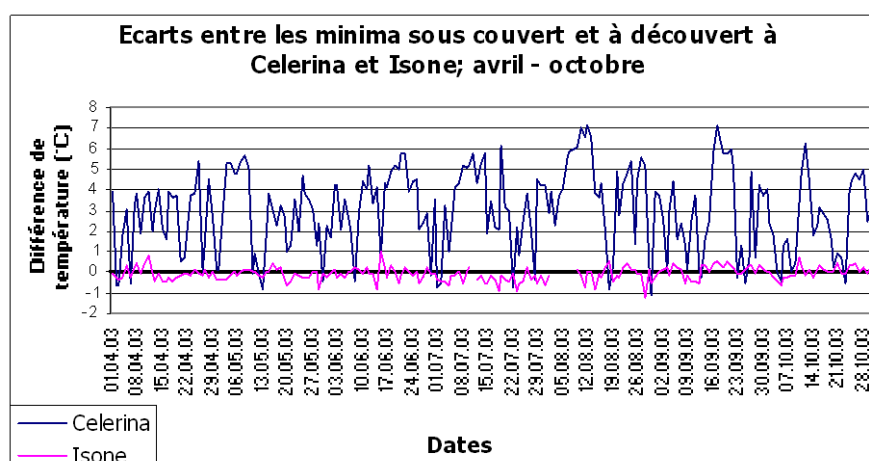
Fig. 9.14. Les écarts les plus et les moins prononcés pour les minima de température

| Station | Couvert – Découvert (°C) Avril - Octobre | Station | Couvert – Découvert (°C) Juin - Août |
|----------|---|---------------|---|
| Celerina | 3.0 | Celerina | 3.4 |
| Viège | 1.67 | Viège | 2.05 |
| (...) | (...) | (...) | (...) |
| Isonne | -0.08 | Bettlachstock | -0.14 |

Source : Données LWF

Le graphique suivant montre l'écart entre les différences pour la période d'avril à octobre en visualisant les résultats pour Celerina, où l'écart est le plus prononcé, et Isonne où il l'est le moins.

Fig. 9.15. Comparaison des minima de température sous couvert et à découvert à Celerina et à Isonne



Source : Données LWF

En termes absolus, la moyenne des minima la plus basse mesurée pendant la période d'avril à octobre se trouve au Parc National dans la station à couvert avec -0.35°C , suivi par la station à découvert à ce même endroit (-0.19°C) et par la station à découvert de Celerina (-0.11°C). La station en forêt au Parc National est également en tête pour la période de juin à août avec une moyenne de 4.07°C , tandis que les deux autres stations sont inversées pour cette période : 4.11°C à Celerina à découvert et 4.29°C au Parc National à découvert. Contrairement à notre hypothèse, nous trouvons donc la moyenne des minima la plus basse dans une station de mesure sous couvert forestier.

La moyenne des minima la moins basse a été mesurée pour la période d'avril à octobre dans la station à découvert de Lausanne et elle se situe à 11.39°C . En deuxième place nous trouvons Novaggio, mais cette fois à couvert, avec une moyenne des minima de 10.93°C , suivie par Lausanne à couvert (10.74°C). Pour la période de juin à août la moyenne des minima la moins basse a été enregistrée à Schänis dans la station à couvert et elle est de 17.11°C , suivie par la station à découvert de ce même site avec 16.78°C et ensuite par la station à couvert de Novaggio avec 16.06°C . Là encore, contrairement à notre hypothèse, il y a pour les deux périodes chaque fois une station à découvert (Lausanne pour avril à octobre et Schänis pour juin à août) parmi celles avec les moyennes des minima les moins basses (Annexe 6).

Fig. 9.16. Hiérarchie des minima pour avril à octobre et pour juin à août

| Station | Minima en $^{\circ}\text{C}$ (Avril – Octobre) | Station | Minima en $^{\circ}\text{C}$ (Juin – Août) |
|--------------------------|---|--------------------------|---|
| Parc National, couvert | -0.35 | Parc National, couvert | 4.07 |
| Parc National, découvert | -0.19 | Celerina, découvert | 4.11 |
| Celerina, découvert | -0.11 | Parc National, découvert | 4.29 |
| (...) | (...) | (...) | (...) |
| Lausanne, couvert | 10.74 | Novaggio, couvert | 16.06 |
| Novaggio, couvert | 10.93 | Schänis, découvert | 16.78 |
| Lausanne, découvert | 11.39 | Schänis, couvert | 17.11 |

Source : Données LWF

En conclusion, ces premières observations et le calcul des moyennes nous indiqueraient que notre hypothèse concernant les maxima (température à couvert plus basse) est confirmée sauf dans deux stations alors que celle au sujet des minima (température à couvert plus haute) ne l'est que légèrement. Dans la partie suivante, nous aimerions vérifier que ces différences sont suffisamment importantes pour être significatives.

9.2.3. Le niveau de significativité de l'écart

9.2.3.1. Les maxima

Examinons d'abord la différence entre les maxima à couvert et à découvert. Pour ces mesures, le test de significativité (Mann Whitney) nous a donné de très bons résultats. Entre avril à octobre, pour 9 stations sur 14, la différence entre les mesures à couvert et ceux à découvert est hautement significative. En commençant par la station avec la différence la plus significative, c'est le cas pour Bettlachstock, Schänis, Othmarsingen, Vordemwald, Neunkirch, Isonne, Celerina, Chironico et Lausanne. La différence entre la température sous couvert forestier et hors couvert pour la station de Jussy est significative et celles pour les

stations de Novaggio et Beatenberg le sont toujours légèrement. Seule les stations au Parc National et à Viège ne montrent pas de différences significatives. **En fait, il s'agit là des deux stations qui font exception à notre hypothèse et où les maxima sont en moyenne plus élevés à couvert qu'à découvert.**

Si nous considérons uniquement les mois de juin, juillet et août, ces résultats se renforcent encore. **Pendant ces trois mois, les stations de Jussy et Novaggio s'ajoutent à celles qui présentent des différences hautement significatives, tandis que le résultat pour Beatenberg l'est seulement légèrement et que les écarts mesurés au Parc National et à Viège ne le sont toujours pas du tout (Annexe 7 et 8).**

Fig. 9.17. Les stations selon le niveau de significativité des écarts (Mann-Whitney)

| | Hautement significatif | Significatif | Légèrement significatif | Pas significatif |
|-----------------|---|--------------|-------------------------|------------------------|
| Avril à Octobre | Bettlachstock Schänis Othmarsingen Vordemwald Neunkirch Isonne Celerina Chironico Lausanne | Jussy | Novaggio Beatenberg | Parc National Viège |
| Juin à Août | Bettlachstock Celerina Chironico Isonne Lausanne Neunkirch Othmarsingen Schänis Vordemwald Novaggio Jussy | | Beatenberg | Parc National Viège |

Source : Données LWF

9.2.3.2. Les minima

Nos résultats montrent des différences hautement significatives entre les minima à couvert et à découvert **à Celerina et à Viège ainsi qu'à Chironico mais dans une moindre mesure. Un écart légèrement significatif peut être constaté à Vordemwald, à Neunkirch et à Jussy.** Par contre, les résultats sont négatifs concernant les stations de Lausanne, Novaggio, Othmarsingen, Beatenberg, Schänis, Nationalpark, Bettlachstock et Isonne, dont le niveau de significativité est le moins élevé.

Comme c'est le cas pour les maxima, le résultat est légèrement meilleur si nous nous limitons aux mois de juin, juillet et août. Pendant cette période, les stations pour lesquelles les résultats sont significatifs ou légèrement significatifs pour avril à octobre, se distinguent **par des résultats très positifs. Cependant, cela ne peut pas s'observer pour Lausanne, Novaggio, Othmarsingen, Beatenberg, Schänis, Nationalpark, Bettlachstock et Isonne où la différence entre minima dans la forêt et à champ ouvert reste non significative pendant les trois mois d'été comme pour le reste de la période étudiée (avril-octobre) (Annexe 9 et 10).**

En conclusion, pour ce qui concerne les maxima, on constate que les deux seules stations dont les différences ne sont pas significatives sont celles où notre hypothèse n'est pas vérifiée (National Park et Viège). Nous pouvons en conclure qu'en moyenne les maxima mesurés en forêt sont généralement significativement moins élevés que ceux mesurés à découvert. Pour les minima par contre, le résultat est mitigé : il est plus difficile de voir une tendance claire.

Finalement, tant pour les maxima que pour les minima, le niveau de significativité des différences pendant les mois de juin, juillet et août est presque chaque fois plus prononcé que pour la période d'avril à octobre. Les seules exceptions se rencontrent à Novaggio pour les minima et à Beatenberg pour les maxima et les minima. Ces résultats nous amènent à la conclusion que les différences entre les températures à couvert et à découvert tant pour les maxima que pour les minima ont tendance à être légèrement plus significatives pendant des périodes particulièrement chaudes.

9.2.4. Corrélation entre écarts prononcés et forte chaleur

Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons exécuté un test de corrélation entre la température mesurée à découvert et les différences des mesures à couvert et à découvert. Nous avons testé la corrélation pour les minima et les maxima. Ce faisant, nous avons pu constater une corrélation significative entre les maxima de température hors couvert forestier et la différence des maxima. Ce ne fut pas le cas pour les minima.

Fig. 9.18. Test de corrélation entre la température à découvert et l'écart couvert-découvert (R^2)

| | R^2 Maxima | Niveau de significativité |
|---------------|--------------|---------------------------|
| Isonne | 0.5311 | 0.1% |
| Othmarsingen | 0.5267 | 0.1% |
| Bettlachstock | 0.4356 | 0.1% |
| Schänis | 0.3626 | 0.1% |
| Jussy | 0.3542 | 0.1% |
| Vordemwald | 0.3307 | 0.1% |
| Lausanne | 0.246 | 2% |
| Novaggio | 0.2442 | 2% |
| Neunkirch | 0.2012 | 5% |
| Nationalpark | 0.1815 | 10% |
| Viège | 0.1804 | 10% |
| Chironio | 0.0839 | |
| Beatenberg | 0.0088 | |
| Celerina | 0.0081 | |

Source : Données LWF

En conclusion, ces résultats indiquent bien que la différence entre les températures à découvert et à couvert est plus prononcée lorsqu'il fait plus chaud. La forêt peut donc jouer un rôle plus important lors de périodes de canicule. Ce constat est central pour la suite de notre travail. Nous aimerions maintenant proposer des pistes interprétatives concernant les différences de situations observées entre stations.

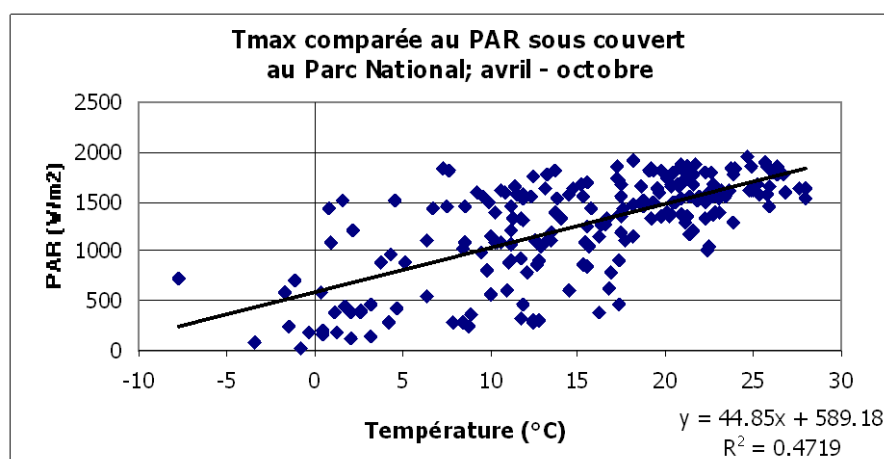
9.2.5. Discussion et conclusion

9.2.5.1. *Corrélation entre rayonnement et température*

Pouvons-nous expliquer les différences de température à couvert et à découvert par les différences du PAR représentant le rayonnement, tant à couvert qu'à découvert ? Afin de déterminer l'influence du PAR sur la température, nous avons calculé la corrélation R^2 pour ces deux paramètres. En incluant les données de toutes les stations, elle se situe à 0.3012 pour les mesures prises à découvert mais seulement à 0.0482 pour les mesures sous couvert forestier. Nous pouvons donc constater qu'en été 2003 à découvert, le niveau de température peut s'expliquer dans une large mesure par l'importance du PAR. Cependant, sous couvert forestier, cette corrélation est moins importante. Il doit donc y avoir d'autres facteurs qui déterminent le niveau de température.

Si nous examinons les stations séparément, les stations de Celerina, du Parc National et de Viège ressortent à nouveau **clairement**. Notons tout d'abord que ces trois sites se distinguent par des taux de PAR comparable entre la forêt et le champ ouvert. En effet, contrairement à ce que nous avons pu observer pour les autres stations, ces deux sites présentent une bonne corrélation entre le PAR et la température même sous couvert forestier comme nous le voyons sur le graphique suivant.

Fig. 9.19. Maxima de température comparés au PAR sous couvert au Parc National



Source : Données LWF

Il est important de préciser que là encore, il faut interpréter les résultats avec prudence, du fait que nos mesures du PAR ne reflètent qu'une partie du rayonnement global, celle utilisée pour la photosynthèse. Nos mesures ne tiennent donc pas compte notamment des rayons UV et infrarouge. Probablement, le taux de PAR qui peut pénétrer jusqu'à la station de mesure sous couvert forestier n'est pas représentatif du rayonnement global que l'on y retrouverait parce que la biomasse en forêt en utilise une part importante pour la photosynthèse. Le fait que nous ne pouvons pas constater de corrélation entre la température mesurée sous couvert forestier et le PAR nous semble surprenant, surtout parce que la recherche en microclimatologie forestière met l'accent sur la diminution du rayonnement dans l'explication des différences de température. Nous allons donc retenir cette approche pour la suite de ce chapitre.

9.2.5.2. *L'influence des caractéristiques de la station*

Nous avons vu dans la partie précédente que les différences entre les maxima à couvert et les maxima à découvert peuvent varier considérablement d'une station à l'autre. Comment pouvons nous expliquer ceci ? Nous avons tenté de trouver les liens entre ces différences de température et les différentes caractéristiques des sites d'observation, tels que la densité des arbres, l'espèce dominante, l'orientation de la pente ou encore le sol. Afin d'examiner l'impact de ces facteurs sur nos résultats, nous avons d'abord trié les stations selon le niveau de significativité des différences de température respectives et nous les avons ensuite mis en relation avec les facteurs mentionnés ci-dessus.

Il nous semble important de rappeler ici les réserves que nous avons faites vis-à-vis de la représentativité de notre échantillon de 14 stations, notamment en ce qui concerne les espèces dominantes ou la distribution dans les régions biogéographiques ainsi que les étages de végétation.

Si nous analysons les maxima, nous pouvons constater un lien évident entre l'importance des différences et les espèces dominantes de chaque station. Ainsi, les maxima à couvert sont plus fortement diminués dans des forêts de hêtre que dans des forêts dont l'espèce dominante est héliophile (chênes, pins). Ces arbres laissent passer plus de rayonnement et permettent ainsi à la zone des troncs de se réchauffer davantage. De ce fait, la différence entre la température mesurée à couvert et celle mesurée à découvert est moins prononcée. Ceci dit, il est surprenant que, contrairement à la température, nous n'ayons pas pu faire cette même distinction entre espèces sciaphiles et espèces héliophiles concernant la luminosité avec nos mesures du PAR.

Le tableau suivant met en lien les stations triées selon leur niveau de significativité de différence entre les maxima et les met ensuite en lien avec l'espèce dominante ainsi qu'avec l'orientation de la pente.

Fig. 9.20. Significativité des écarts couvert - découvert des maxima des températures et différentes caractéristiques des stations de mesures

| Station | p-value Mann-Whitney | Espèce dominante | Orientation |
|---------------|----------------------|------------------|-------------|
| Bettlachstock | 8.00E-06 | Hêtre | S |
| Schänis | 1.20E-05 | Hêtre | W |
| Othmarsingen | 1.60E-05 | Hêtre | S |
| Vordemwald | 4.10E-05 | Sapin | NW |
| Neunkirch | 4.80E-05 | Hêtre | N |
| Isonne | 5.40E-05 | Hêtre | NE |
| Celerina | 0.00016 | Arole | NE |
| Chironico | 0.00039 | Epicéa | N |
| Lausanne | 0.00041 | Hêtre | NE |
| Jussy | 0.00518 | Chêne | |
| Novaggio | 0.01692 | Chêne | S |
| Beatenberg | 0.01901 | Epicéa | SW |
| Parc National | 0.62154 | Pin de montagne | S |
| Viège | 0.66198 | Pin sylvestre | N |

Source : Données LWF

Dans les six premières stations, cinq se caractérisent **par une forêt de hêtre**. L'exception est Vordemwald, classée en quatrième position et où nous trouvons une forêt composée principalement de sapin.

Par contre, parmi les cinq stations qui se distinguent par des différences peu ou pas significatives, quatre sont composées de chênes et de pins. De plus, les deux stations à **couvert dont les maxima sont en moyenne plus élevés à couvert qu'à découvert** sont composées de pin de montagne et de pin sylvestre. Rappelons ici que les pins sont caractéristiques de conditions climatiques et pédologiques particulières ; ils supportent **facilement la sécheresse et l'acidité du sol, par conséquent leur présence implique une sécheresse de l'air qui a également un effet sur la température (moins d'énergie radiative étant transformée en énergie latente)**. De même, leur structure joue probablement un rôle dans cet état des faits. Ceci étant dit, dans le cas de Viège, nous devons aussi prendre en compte le fait que les deux stations **de mesure sont considérablement éloignées l'une de l'autre** : celle à couvert se trouve sur une pente tandis que celle à découvert se trouve au fond de la vallée du Rhône. Il est donc probable que le type de sol diffère ; avec un sol plutôt mince en pente **laissant la roche apparaître, alors que l'accumulation de sédiments au fond de la vallée aboutit à un type de sol plus riche**.

La seule exception est la forêt d'arole, qui fait partie de la famille des pins, et que nous retrouvons à Celerina qui se situe en septième position. La différence relativement **importante entre Celerina et le Parc National nous paraît surprenante**. Ceci dit, l'arole est une espèce climacique, sciaphile contrairement aux autres espèces de pins. Les résultats concernant le PAR ont montré une situation similaire pour Celerina, le Parc National ainsi que pour Viège. Cependant, les différences de température entre couvert forestier et découvert ne se présentent pas de la même façon. Celerina et le Parc National se trouvent à une altitude **similaire dans la même région biogéographique**. **La forêt d'arole à Celerina est nettement moins dense que celle au Parc National (respectivement 234 et 1228 arbres par hectares)**.

Les forêts d'épicéa et de sapin finalement présentent un résultat plus ambigu et les stations contenant ces espèces sont malheureusement trop peu nombreuses pour pouvoir en tirer des conclusions. En effet, un point qui nous semble remarquable est le classement des deux **stations avec des forêts d'épicéa, soit Beatenberg et Chironico**. Les caractéristiques de ces deux stations sont très similaires (espèce dominante, altitude, inclinaison de pente, densité) et elles se différencient uniquement par leur exposition. Les différences entre les maxima à couvert et à découvert devraient donc logiquement être plus importantes à Beatenberg qui se situe sur une pente orientée vers le sud-ouest qu'à Chironico qui se situe sur une pente orientée vers le nord. **Ce n'est pas le cas comme nous pouvons le voir dans le tableau précédent**. Cela est peut-être dû en partie au fait que ces deux stations se situent dans des régions biogéographiques différentes : Beatenberg se trouve dans la région des Préalpes au niveau sub-alpin, tandis que Chironico se situe au **sud des Alpes à l'étage montagnard**. Cela malgré **le fait que l'altitude de ces deux stations est presque identique**.

Nous pouvons constater, toujours sur le tableau précédent, **que l'orientation de la pente joue également un rôle, secondaire toutefois**. En effet, parmi les hêtraies, **nous trouvons d'abord les stations dont la pente est orientée vers le sud ou l'ouest et seulement ensuite les stations avec des versants nord et nord-est**. Il est plus difficile de voir des tendances pour les stations avec des forêts dominées par des espèces héliophiles du fait que notre échantillon **n'en comprend pas suffisamment (4 stations sur 14)**.

Si nous considérons par contre les minima, la situation est différente, comme nous pouvons le voir dans le tableau suivant :

Fig. 9.21. Significativité des écarts couvert – découvert des minima des températures sous et différentes caractéristiques des stations de mesures

| Station | p-value Mann-Whitney | Espèce dominante | Orientation |
|---------------|----------------------|------------------|-------------|
| Celerina | 2.06E-06 | Arole | NE |
| Viège | 0.00087 | Pin sylvestre | N |
| Chironico | 0.00894 | Epicéa | N |
| Vordemwald | 0.01140 | Sapin | NW |
| Neunkirch | 0.02716 | Hêtre | N |
| Jussy | 0.02831 | Chêne | |
| Lausanne | 0.21239 | Hêtre | NE |
| Novaggio | 0.49127 | Chêne | S |
| Othmarsingen | 0.57975 | Hêtre | S |
| Beatenberg | 0.60162 | Epicéa | SW |
| Schänis | 0.64481 | Hêtre | W |
| Parc National | 0.64727 | Pin de montagne | S |
| Bettlachstock | 0.80374 | Hêtre | S |
| Isonne | 0.86768 | Hêtre | NE |

Source : Données LWF

Il semble dans ce cas que ce sont avant tout les différentes orientations de la pente qui peuvent être mises en relation avec le niveau de significativité des écarts entre les minima à couvert et les minima à découvert. Nous constatons que les stations avec une orientation au nord se situent en haut du tableau contrairement aux stations caractérisées par une exposition sud, ouest et sud-ouest où les différences entre couvert et découvert ne sont pas significatives. **Seule la station d'Isonne n'entre pas dans cette classification** : située sur une pente orientée vers le nord-est, elle ne présente pourtant pas les mêmes singularités. Toutefois Isonne est parmi les stations où **les minima sont en moyenne plus bas en forêt qu'à découvert** et où notre **hypothèse concernant les minima n'est donc pas confirmée**.

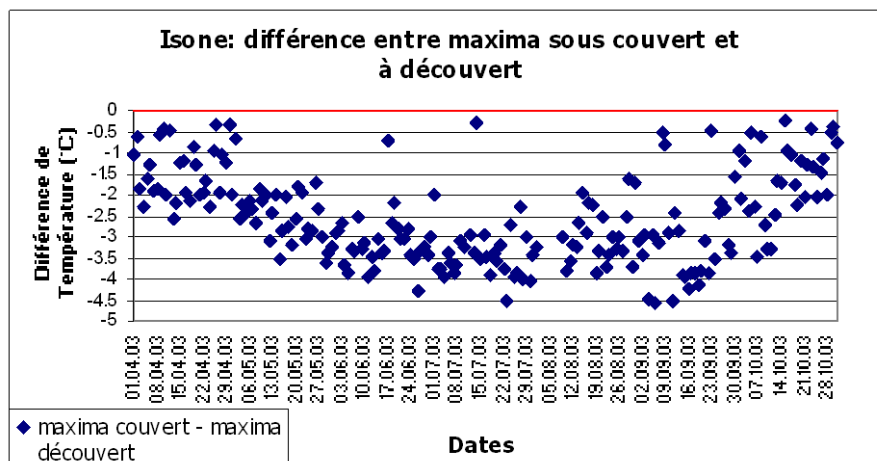
Pour les minima, l'influence de l'espèce dominante semble être secondaire par rapport à l'orientation de la pente pour expliquer le niveau de significativité des différences entre couvert et découvert. Il est remarquable que les quatre stations classées en haut du tableau, donc ayant des différences significatives, soient caractérisées par des forêts de conifères tandis que les forêts de feuillus se trouvent plutôt dans les stations avec des différences faibles entre les minima.

En résumé, nous pouvons noter que nos résultats montrent des différences plus importantes entre les maxima sous couvert forestier et les maxima à découvert lorsque la forêt est composée de hêtres notamment. En plus, les différences sont plus importantes lorsque cette forêt se trouve sur un versant orienté plutôt vers le sud que sur une pente orientée vers le nord. Par contre, dans notre échantillon, les écarts entre les minima à couvert et à découvert sont plus importants dans des forêts situées sur des pentes orientées vers le nord que sur des pentes orientées vers le sud. De plus, ces différences sont généralement plus importantes dans des forêts de conifères que dans des forêts de feuillus.

9.2.5.3. Diverses tendances dans l'évolution temporelle des écarts

Nous pouvons constater plusieurs types d'évolution dans le temps des différences entre les maxima à couvert et à découvert. Pour beaucoup de stations, cette distribution prend une forme en U plus ou moins nette. Ceci signifie que **l'écart entre les températures sous couvert et à découvert est moins élevé au printemps et en automne qu'il ne l'est pendant l'été**. Les stations présentant une telle distribution (Vordemwald, Novaggio, Isonne, Jussy, Othmarsingen, Lausanne, Bettlachstock et Neunkirch) se singularisent par la présence de feuillus. De plus, nous avons montré dans le chapitre précédent en utilisant les mesures du PAR que **l'éclosion des feuilles au printemps a un effet bien visible sur le niveau du rayonnement qui peut atteindre le sol en forêt de feuillus**. Par contre, la situation automnale est plutôt due à **la diminution de l'intensité du rayonnement ainsi qu'à un effet probable de l'augmentation de la nébulosité**. En effet, selon DAVIES-COLLEY et. al. (2000, p.118) ainsi que selon CARLSON et. al. (1995, p.323), la présence de nuages amoindrit considérablement les différences entre les températures à couvert et celles à découvert. Pour illustrer ce point, nous présentons ici la distribution des différences entre maxima et minima à Isonne.

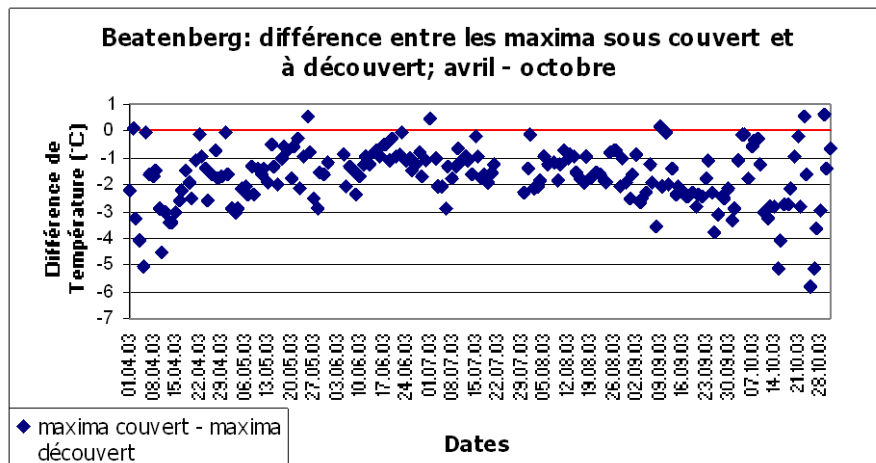
Fig. 9.22. Différences couvert – découvert des maxima de température à Isonne (avril – octobre 2003)



Source : Données LWF

Par contre, pour les stations avec des forêts de conifères, la distribution mensuelle présente une autre répartition, pouvant même prendre une forme opposée à celle des forêts de feuillus comme le montre l'exemple suivant de Beatenberg. (Retenons toutefois que les différences mesurées à Beatenberg ne sont que légèrement significatives).

Fig. 9.23. Différences couvert – découvert des maxima de température à Beatenberg (avril - octobre 2003)

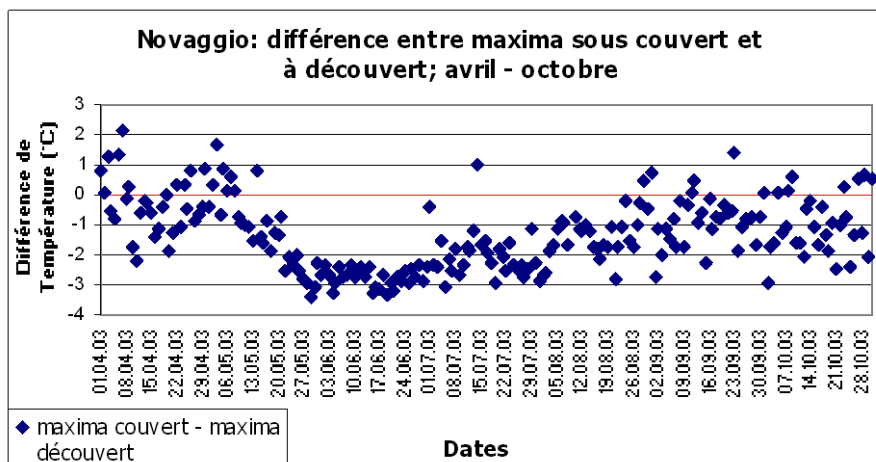


Source : Données LWF

9.2.5.4. Deux stations particulières

Les sites de Novaggio et de Viège ne correspondent pas aux tendances générales que nous venons de décrire. À Novaggio, le chêne domine la station à couvert mais nous y trouvons également du châtaignier et du bouleau. C’est surtout le mois d’avril qui est remarquable pour cette station, commençant par des maxima plus élevés à couvert qu’à découvert. Au cours des deux semaines suivantes, cette situation s’inverse et les maxima sont alors plus élevés à découvert. Par la suite, nous observons une deuxième inversion : les maxima sont donc de nouveau plus élevés sous couvert forestier au début du mois de mai. Par la suite, nous observons à nouveau une distribution des différences de températures typique des autres stations de forêts de feuillus. Cependant, nous avons constaté dans le chapitre consacré au PAR que la station à découvert est placée dans une clairière à proximité de la forêt.

Fig. 9.24. Différences couvert – découvert des maxima de température à Novaggio (avril - octobre 2003)



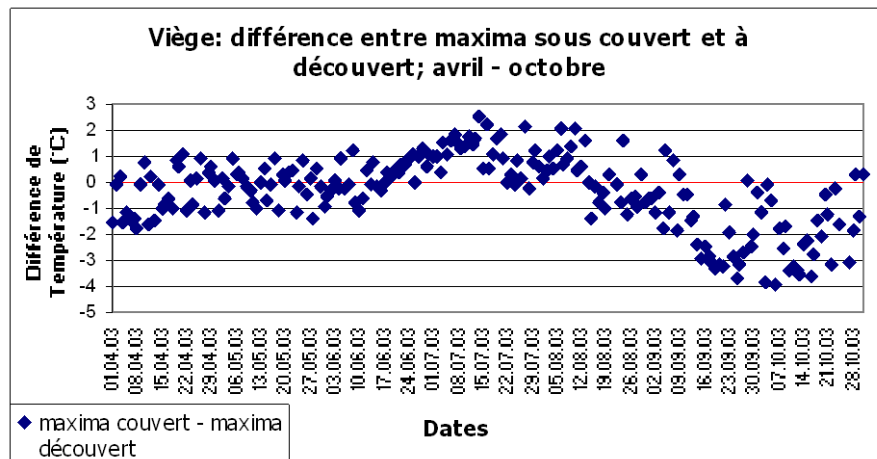
Source : Données LWF

Le graphe suivant illustre les différences entre les maxima de température à couvert et les maxima à découvert pour la station de Viège où la distribution est également particulière : pour la période entre début avril et mi juin, il est difficile de constater une tendance, les

différences se situant entre -1°C et $+1^{\circ}\text{C}$. Par la suite, les maxima deviennent plus élevés à couvert qu'à découvert. Cependant, cette tendance est inversée à partir de mi-août et les maxima sont presque toujours plus élevés à découvert qu'à couvert à partir du mois de septembre. C'est donc avant tout pendant la période la plus chaude de l'été 2003 que les maxima à Viège ont été plus élevés sous couvert forestier qu'en dehors de la forêt (Retenons une fois encore l'emplacement différencié des deux stations du site de Viège).

Des cartes géographiques illustrant l'emplacement des stations de mesures de ces deux sites se trouvent en Annexe 11 et 12.

Fig. 9.25. Différences couvert – découvert des maxima température à Viège (avril à octobre 2003)



Source : Données LWF

Ainsi les cas d'Isove et de Viège illustrent tout à fait le point relevé par Lützke (LÜTZKE, 1961. pp. 17 – 20) dans sa critique de l'emplacement des stations dans les premières recherches concernant le climat sous couvert forestier comparé au climat à ciel ouvert. En effet, le choix de l'emplacement peut considérablement influencer les conclusions que l'on tire des mesures. Cependant, pour notre étude concernant l'influence sur le bien-être, les mesures de ces deux stations nous seront tout de même utiles si nous gardons à l'esprit ces réserves. Ainsi, pour Viège, nous pourrions examiner l'influence du climat à ces deux endroits précis.

9.3. HUMIDITÉ DE L'AIR RELATIVE

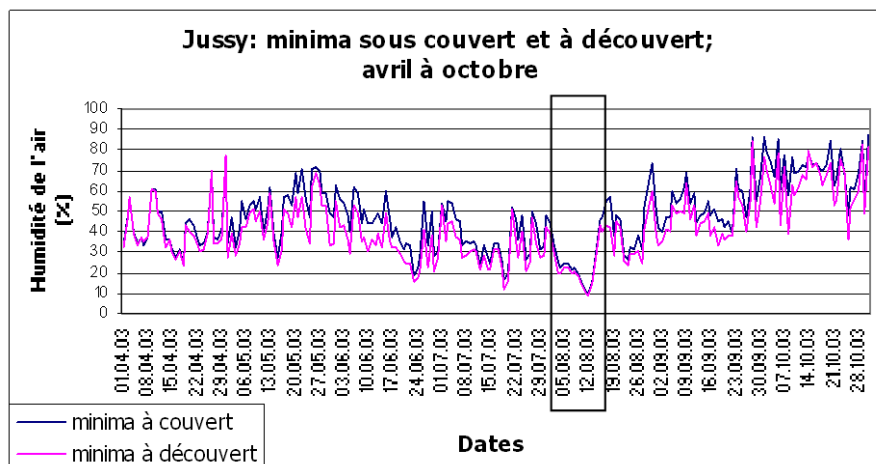
9.3.1. Introduction

L'humidité de l'air relative est d'après sa définition étroitement liée à la température. Puisqu'une portion d'air chaud peut contenir plus d'eau qu'une portion d'air froid, l'humidité de l'air relative dans le premier cas est moins élevée que dans le deuxième si l'humidité de l'air absolue reste constante. Dans le chapitre précédent, nous avons montré que nos résultats confirment l'idée d'un climat plus tempéré sous couvert forestier qu'en dehors de la forêt. Nous devrions donc pouvoir observer le même phénomène dans le cas de l'humidité de l'air relative. Des maxima de température moins élevés en forêt entraîneraient des minima d'humidité de l'air relative moins bas et inversement les minima de température moins bas en forêt correspondraient à des maxima d'humidité de l'air relative moins élevés.

Nous voyons clairement sur les graphiques suivants, que, semblablement à la température, les journées de chaleur particulièrement prononcée en août ressortent. La première moitié du mois d'août est ainsi singularisée par des mesures d'humidité de l'air relativement basses

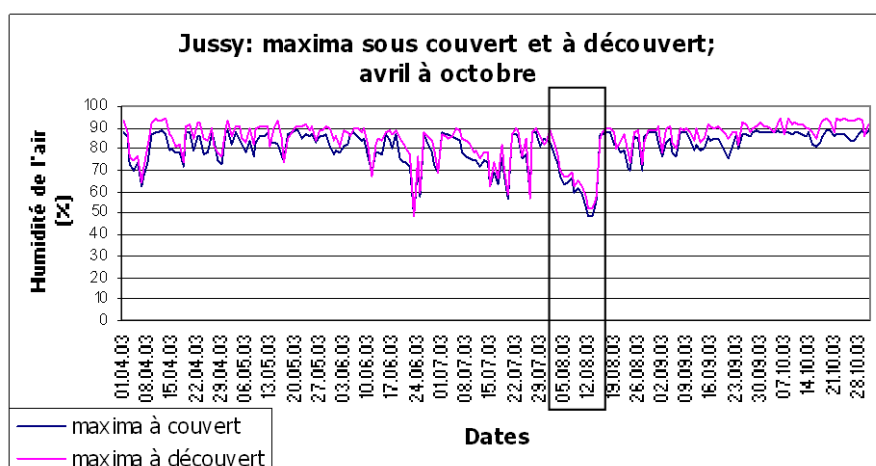
tant pour les minima que pour les maxima. La deuxième figure, montrant la situation à Jussy, illustre bien ce fait.

Fig. 9.26. Minima d'humidité de l'air relative sous couvert et à découvert à Jussy (avril - octobre 2003)



Source : Données LWF

Fig. 9.27. Maxima d'humidité de l'air relative sous couvert et à découvert à Jussy (avril - octobre 2003)



Source : Données LWF

Comme nous l'avons fait pour la température, nous allons d'abord étudier les différences entre les moyennes des maxima et des minima mesurés à couvert et à découvert. Ensuite, nous examinerons le niveau de significativité de ces différences et nous terminerons par une évaluation de la corrélation entre la température et l'humidité de l'air relative mesurée au même moment.

9.3.2. Importance de l'écart entre couvert et découvert

9.3.2.1. Les maxima

En général, nous constatons que les différences entre les mesures sous couvert forestier et celles prises en dehors de la forêt restent faibles. Cependant, une tendance vers des moyennes de mesures maximales d'humidité de l'air relative moins élevées à couvert qu'à découvert se dessine. Pour la période d'avril à octobre, nous pouvons observer cette

situation dans 10 de nos 14 stations d'observation, notre hypothèse est donc confirmée sauf pour les stations de Bettlachstock, Isonne, Lausanne et Vordemwald. De plus, pour trois de ces stations, la différence reste en dessous de 1%. Les écarts les plus prononcés peuvent être observés à Viège avec une différence de -13.75% et à Celerina (-9.61%) pour la période d'avril à octobre. C'est également dans ces deux sites que la différence est la plus importante pendant les trois mois d'été avec -14.62% à Viège et -11.35% à Celerina.

Fig. 9.28. Les écarts les plus prononcés pour les maxima d'humidité de l'air relative

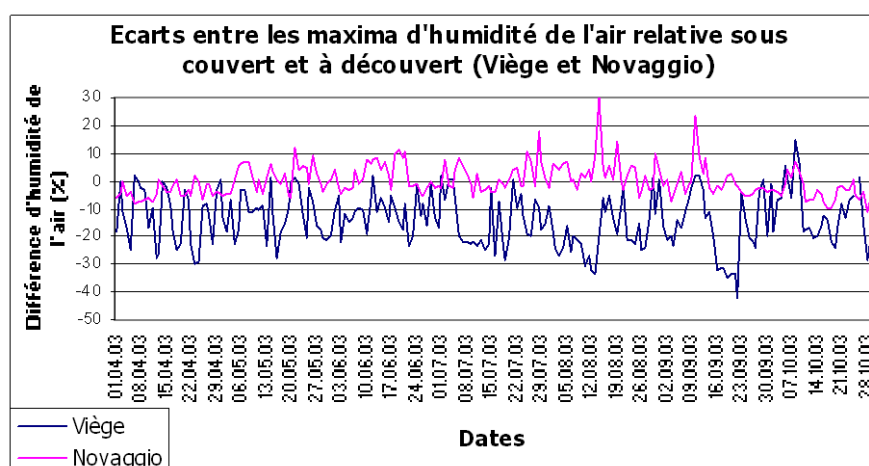
| Stations | Couvert – Découvert (%) | |
|----------|-------------------------|-------------|
| | Avril – Octobre | Juin - Août |
| Viège | -13.75 | -14.62 |
| Celerina | -9.61 | -11.35 |

Source : Données LWF

De façon semblable aux températures, les différences entre les maxima d'humidité de l'air relative sont légèrement plus prononcées pendant les trois mois estivaux que pendant la période d'avril à octobre. Toutefois, trois stations ne correspondent pas à cette caractéristique. Il s'agit des stations de Jussy, du Parc National ainsi que de celle de Vordemwald.

Le graphique suivant montre l'importance de l'écart entre la station avec les différences les plus prononcées et celle avec l'humidité de l'air relative la plus similaire entre la station sous couvert forestier et celle à découvert pour la période d'avril à octobre 2003.

Fig. 9.29. Comparaison des maxima d'humidité de l'air relative sous couvert et à découvert à Viège et à Novaggio (avril – octobre 2003)



Source : Données LWF

Le climat le plus humide en moyenne pour la période d'avril à octobre a été celui trouvé à Vordemwald sous couvert forestier. La moyenne des maxima d'humidité de l'air relative qui y ont été enregistrés s'élève à 91.98%. La moyenne des maxima d'humidité de l'air relative mesurée à Celerina dans la station à découvert est similaire (91.4%). Entre juin et août, la moyenne des maxima d'humidité de l'air la plus élevée a été mesurée à Celerina à découvert (91.93%) suivi par Vordemwald en forêt avec un taux de 87.92%. Par contre, les maxima les moins élevés pour la période d'avril à octobre sont mesurés dans la station sous couvert forestier de Viège (72.52%) suivi par celle sous couvert forestier de Chironico (74.39%). Pour les trois mois estivaux, l'ordre s'inverse, mais les mesures sont quasiment identiques avec une moyenne des maxima d'humidité de l'air relative de 70.52% à Chironico et de 70.86% à Viège (Annexe 13).

Fig. 9.30. Hiérarchie des maxima d'humidité de l'air pour avril à octobre et pour juin à août 2003

| Stations | Humidité de l'air (%) Avril – Octobre | Stations | Humidité de l'air (%) Juin - Août |
|------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|
| Vordemwald, couvert | 91.98 | Celerina, découvert | 91.93 |
| Celerina, découvert | 91.40 | Vordemwald, couvert | 87.92 |
| (...) | (...) | (...) | (...) |
| Chironico, couvert | 74.39 | Viège, couvert | 70.86 |
| Viège, couvert | 72.52 | Chironico, couvert | 70.52 |

Source : Données LWF

9.3.2.2. Les minima

Comme c'est le cas pour les mesures des maxima, les différences constatées entre les moyennes des minima d'humidité de l'air relative restent très faibles. Cependant, nos résultats montrent que les minima mesurés en dehors de la forêt sont tendanciellement plus élevés que ceux mesurés sous couvert forestier. Ainsi, pour la période d'avril à octobre, seulement une station, celle de Viège, montre des minima à couvert moins élevés que ceux à découvert. Or, les mesures sont quasiment identiques et la différence est de -0.07% uniquement. Pour les mesures prises pendant les mois de juin, juillet et août, le Parc National se distingue à son tour par des minima légèrement plus prononcés sous couvert forestier, mais là-aussi, cette différence reste en dessous de 1% (-0.5% pour Viège et -0.28% pour le Parc National). Ce sont également les différences de ces deux stations, Viège pour la période d'avril à octobre et le Parc National pour la période de juin à août, qui sont les moins prononcées. Parmi les stations avec les écarts les plus prononcés entre les minima enregistrés sous couvert forestier et en dehors de la forêt, nous trouvons Vordemwald pour la période d'avril à octobre avec un écart de 8.77% et Lausanne pour les trois mois estivaux avec un écart de 8.51%.

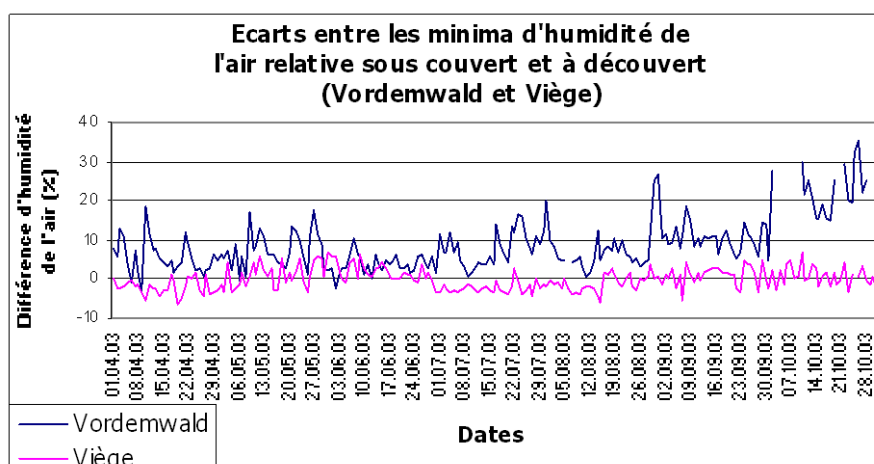
Fig. 9.31. L'écart le plus et le moins prononcé pour les minima d'humidité de l'air relative

| Stations | Couvert – Découvert (%) Avril - Octobre | Stations | Couvert – Découvert (%) Juin - Août |
|------------|--|---------------|--|
| Vordemwald | 8.77 | Lausanne | 8.51 |
| (...) | (...) | (...) | (...) |
| Viège | -0.07 | Parc National | -0.28 |

Source : Données LWF

Contrairement à ce qui a pu être observé dans le cas des maxima ou encore pour les températures, les écarts de minima du taux d'humidité entre couvert et découvert sont plus importants pendant les trois mois estivaux pour seulement la moitié des stations. Sur le graphique présenté ci-dessous, qui montre la variabilité de l'écart entre les diverses stations pour la période d'avril à octobre, nous constatons effectivement des différences plus prononcées surtout en automne.

Fig. 9.32. Comparaison des minima d'humidité de l'air relative sous couvert et à découvert à Vordemwald et à Viège (avril – octobre 2003)



Source : Données LWF

Le climat le plus sec en ce qui concerne les minima de l'humidité de l'air relative se trouve à Viège dans la station de mesure sous couvert forestier comme c'est également le cas pour les maxima. Les minima y sont de 32.49% en moyenne pour la période d'avril à octobre et de 29.49% pour les trois mois estivaux. A l'autre bout de l'échelle, nous pouvons constater que les minima les moins bas pour tout le semestre sont mesurés à Bettlachstock sous couvert forestier (55.95%) et à Beatenberg, également en forêt, pour la période entre juin et août (50.55%) (Annexe 13).

Fig. 9.33. Hiérarchie des minima d'humidité de l'air pour avril à octobre et pour juin à août 2003

| Stations | Humidité de l'air (%) Avril – Octobre |
|------------------------|--|
| Viège, couvert | 32.49 |
| (...) | (...) |
| Bettlachstock, couvert | 55.95 |

| Stations | Humidité de l'air (%) Juin - Août |
|---------------------|--------------------------------------|
| Viège, couvert | 29.49 |
| (...) | (...) |
| Beatenberg, couvert | 50.55 |

Source : Données LWF

9.3.3. Le niveau de significativité de l'écart

En ce qui concerne les maxima, la situation est mitigée. L'écart entre humidité relative à couvert et à découvert pour la période d'avril à octobre est hautement significatif pour sept stations (Beatenberg, Chironico, Celerina, Jussy, Othmarsingen, Viège, Vordemwald). Il ne l'est que légèrement au Parc National et à Neunkirch et il ne l'est pas pour cinq autres (Bettlachstock, Isonne, Lausanne, Novaggio, Schänis). Le résultat devient encore plus problématique si nous prenons en considération uniquement les mois de juin, juillet et août. Là, la différence entre les maxima d'humidité de l'air relative sous couvert forestier et à découvert est nettement significative à Celerina, Othmarsingen et Viège, significative à Chironico et à Jussy. La comparaison n'est que légèrement significative pour Beatenberg, Neunkirch et Vordemwald et elle ne l'est pas pour les six stations de Bettlachstock, Isonne, Lausanne, Novaggio, Parc National et Schänis.

Fig. 9.34. Les stations selon le niveau de significativité des écarts entre les maxima d'humidité de l'air relative couvert - découvert (Mann-Whitney)

| | Hautement significatif | Significatif | Légèrement significatif | Pas significatif |
|-----------------|---|--------------------|---------------------------------------|---|
| Avril à Octobre | Othmarsingen Vordemwald Celerina Viège Jussy Beatenberg Chironico | | Parc National Neunkirch | Lausanne Novaggio Isonne Bettlachstock Schänis |
| Juin à Août | Celerina Viège Othmarsingen | Chironico Jussy | Beatenberg Vordemwald Neunkirch | Novaggio Isonne Parc National Bettlachstock Schänis Lausanne |

Source : Données LWF

Les résultats que nous avons obtenus pour les minima sont comparables à ceux des maxima. **Ces résultats ne nous permettent donc pas d'affirmer que l'humidité de l'air relative sous couvert est caractérisée par nettement moins d'extrêmes que celle à découvrir.** Néanmoins, nous constatons une légère tendance qui se dessine en ce sens (Annexe 14 à 17).

9.3.4. Corrélation entre humidité et température

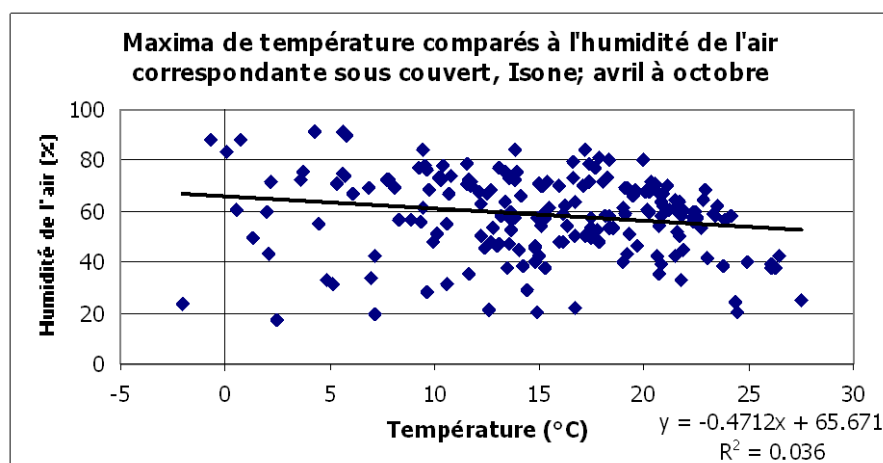
Dans ce chapitre, nous cherchons à mettre en relation **le niveau d'humidité de l'air relative** avec la température. Pour ce faire, nous avons utilisé les mesures des maxima de **température ainsi que de l'humidité de l'air relative enregistrées** au même moment et nous avons calculé leur degré de corrélation. Globalement, pour toutes les stations, nous avons obtenu des résultats très similaires pour la situation sous couvert forestier et celle sur un champ ouvert, le résultat pour le R^2 se situant pour les deux cas à 0,33. Sans surprise, le niveau de corrélation **entre la température et l'humidité de l'air mesurée au même moment** est donc significatif (p-value=0.01). Si nous examinons les stations séparément, la situation se présente plus nuancée, comme nous pouvons le voir dans le tableau suivant.

Fig. 9.35. Test de corrélation entre l'humidité de l'air relative et la température sous couvert et à découvert (R^2)

| Stations | R^2 à découvert | Stations | R^2 à couvert |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|-----------------|
| Isonne | 0.0932 | Isonne | 0.0360 |
| Novaggio | 0.1523 | Novaggio | 0.1355 |
| Viège | 0.2227 | Viège | 0.1981 |
| Chironico | 0.2376 | Celerina | 0.3074 |
| Celerina | 0.2704 | <i>Toutes les stations</i> | 0.3317 |
| Nationalpark | 0.3302 | Chironico | 0.3437 |
| <i>Toutes les stations</i> | 0.3338 | Nationalpark | 0.3961 |
| Beatenberg | 0.3638 | Beatenberg | 0.4242 |
| Lausanne | 0.5054 | Schänis | 0.4375 |
| Schänis | 0.5055 | Lausanne | 0.4410 |
| Vordemwald | 0.5499 | Neunkirch | 0.5158 |
| Neunkirch | 0.5692 | Jussy | 0.5286 |
| Jussy | 0.5704 | Othmarsingen | 0.5514 |
| Othmarsingen | 0.5778 | Bettlachstock | 0.5617 |
| Bettlachstock | 0.6169 | Vordemwald | 0.5697 |

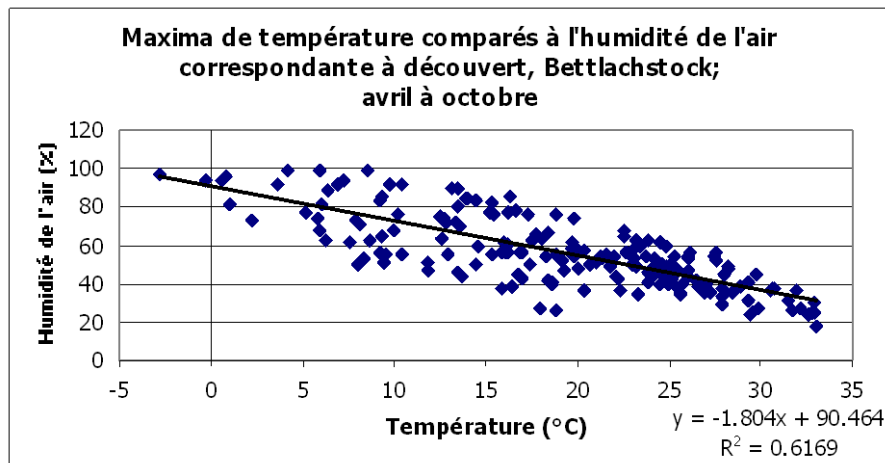
Source : Données LWF

Les corrélations observées à découvert sont légèrement plus fortes que celles observées sous couvert forestier. Mais il y a également des divergences considérables d'une station à l'autre. Les deux graphiques suivants nous permettent d'illustrer clairement ces écarts.

Fig. 9.36. Maxima de température comparés à l'humidité de l'air correspondante sous couvert (avril - octobre 2003, Isonne)

Source : Données LWF

Fig. 9.37. Maxima de température comparés à l'humidité de l'air correspondante à découvert (avril - octobre 2003, Bettlachstock)



Source : Données LWF

9.3.5. Discussion et conclusion

Comment pouvons-nous interpréter ces répartitions? **Tout d'abord, les stations caractérisées** par des niveaux de corrélation relativement faibles se situent sur le versant sud des alpes, sur une roche-mère granitique acide, tandis que celles avec des niveaux de corrélation plutôt bonnes se trouvent sur le **plateau (Molasse, Flysch)** ou sur **l'arc jurassien calcaire**. Ensuite, il est remarquable que les stations situées sur un Podsol présentent les moins bonnes **corrélation entre la température et l'humidité de l'air**. On sait que le Podsol est un type de sol drainant, **généralement composé d'une strate d'humus conséquente et de forte activité biologique**. Malheureusement, nous ne disposons pas, à ce stade de notre recherche, des **informations nécessaires comme l'épaisseur et la texture du sol nous permettant de tirer une conclusion de cette observation**. Du fait que l'ordre des stations selon leur niveau de corrélation change peu entre les mesures prises sous couvert forestier et celles prises à découvert, nous pouvons en déduire **que l'influence de la géomorphologie prime sur l'influence de la végétation afin d'expliquer le niveau de corrélation entre la température et l'humidité de l'air relative**.

9.4. VITESSE DU VENT

La vitesse du vent mesurée pendant l'été 2003 a été particulièrement faible. Ainsi, aucune station ne présente une « moyenne de la moyenne » plus élevée que les 2.8 m/s calculés pour la station à découvert à Viège entre avril et octobre. Pour cette même période, à découvert, le vent dépasse les 2 m/s seulement dans deux stations (Lausanne et Viège), alors que quatre autres stations présentent entre 1 et 2 m/s. Pour les autres, la vitesse du vent se situe à une moyenne de moins de 1 m/s. Ces résultats nous paraissent trop faibles pour pouvoir en déduire des conclusions. De plus, nous ne pouvons pas constater de **grandes différences entre les mesures enregistrées pendant la période d'avril à octobre et ceux des trois mois estivaux**.

Cependant, nos mesures confirment que la vitesse du vent est toujours inférieure dans la station de mesure en forêt par rapport à la station en plein air.

9.5. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

A ce stade de notre travail, jusqu'à quel point les résultats que nous venons d'exposer nous permettent-ils de corroborer nos deux hypothèses concernant le climat en forêt ? Rappelons qu'il s'agit premièrement de démontrer que le climat en forêt est plus tempéré comparé au climat en dehors de la forêt et deuxièmement que cette différence est d'autant plus prononcée lorsqu'il fait particulièrement chaud.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre consacré au bilan des connaissances actuelles en microclimatologie forestière, les chercheurs affirment globalement que la température maximale en forêt est moins importante que celle à découvert. Nos résultats concordent largement avec ces conclusions dans la grande majorité de nos stations. Mitscherlich souligne l'effet des forêts composées d'arbres héliophiles ou sciaphiles et ce critère s'est avéré central dans notre recherche pour pouvoir expliquer les différences de température entre les deux écosystèmes. Cependant, nous avons pu montrer que, notamment dans la forêt de pin sylvestre de Viège et dans la forêt de pin de montagne au Parc National, deux espèces héliophiles, la situation peut même s'inverser. Il sera très intéressant de voir lors de la thèse de V. Renaud si cette situation se reproduit dans d'autres périodes ou si elle est spécifique à l'été 2003 caractérisé par ses températures particulièrement élevées. Cependant, il faut rappeler qu'une partie de cette particularité à Viège peut s'expliquer par le fait que les deux stations sont placées dans des environnements assez divers. De plus, le test Mann-Whitney a indiqué que ces différences ne sont pas très significatives et peuvent être attribuées au hasard.

Flemming (1994, p.72) **parle de la possibilité théorique de températures de l'air plus élevées en forêt qu'en dehors de la forêt, notamment quand la quantité d'énergie qui atteint la zone des troncs dépasse la capacité du vent de diffuser la chaleur produite. Un seul exemple dans la littérature à notre connaissance illustre en partie ce phénomène : il s'agit d'une forêt xérophile caractéristique du maquis méditerranéen (PAVARI, 1962). Cette question reste malgré tout encore irrésolue.**

Pour les températures minimales, nos résultats ont souvent montré des différences non significatives, donc des situations similaires à couvert et à découvert. Cependant, nous avons **d'une part** pu constater une certaine tendance vers des minima moins prononcés en forêt **qu'en dehors de la forêt et d'autre part nous avons vu que l'orientation de la pente** et que la différence entre forêts de feuillus et forêts de conifères a une influence sur la température de l'air minimale.

L'humidité de l'air relative est également légèrement plus tempérée en forêt qu'à champ ouvert, mais avec des différences souvent minimes et un nombre considérable d'exceptions. Sans surprise, nous avons pu constater une forte corrélation entre la température maximale et l'humidité de l'air relative minimale ainsi qu'entre la température minimale et l'humidité de l'air relative maximale. Nous avons également constaté que le type de sol a une influence plus importante que le type d'arbres ; des sols caractérisés par une strate importante d'humus étant à la base d'un climat plus humide.

Quant à l'effet refroidissant du vent, il s'est révélé minime pendant l'été 2003.

Pour conclure, concernant l'hypothèse d'un climat plus modéré en forêt, nos mesures nous permettent de la corroborer d'une façon générale mais surtout en ce qui concerne les maxima. Cependant, concernant les deux sites de Viège et de Parc National, notre hypothèse non seulement n'est pas validée mais de plus on peut y observer une tendance légèrement opposée. Nous pensons que le type de végétation, deux espèces de pin, joue un rôle déterminant dans cet état des faits.

La deuxième hypothèse a également pu être corroborée tant par les résultats du test de corrélation entre les différences mesurées et la température enregistrée à découvert que par **l'observation du niveau de significativité** dont les différences sont généralement plus prononcées pour la période de juin à août que pour celle **d'avril à** octobre. Il faut pourtant ajouter que les premiers résultats obtenus pour la station de Beatenberg entre 1998 et 2006 montrent des résultats généralement plus importants pendant **l'hiver que pendant l'été** (V.Renaud, projet de thèse en cours). Là encore, il y a une thématique qui pourra être **approfondie en comparant l'été exceptionnel de 2003 avec les résultats d'étés plus normaux.**

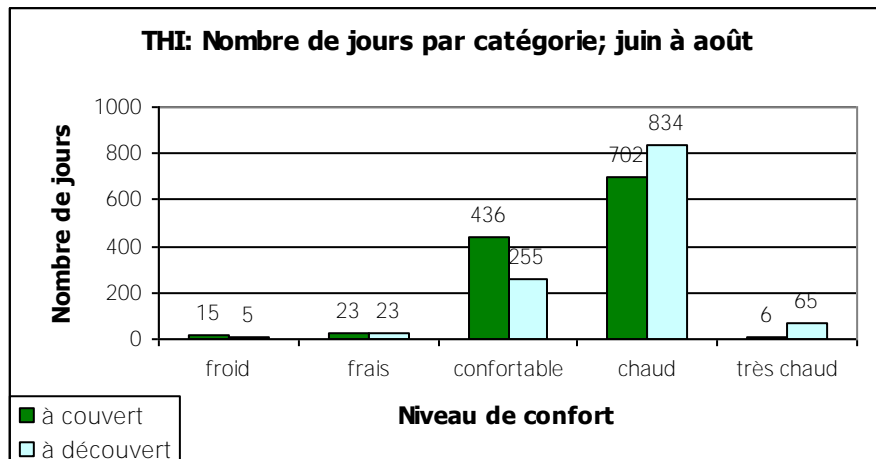
10. LES RÉSULTATS : INDICES BIOCLIMATIQUES

10.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous introduirons les résultats obtenus en calculant deux indices bioclimatiques, le Temperature Humidity Index (THI) et Humidex que nous avons présentés plus en détail dans le chapitre 8.2. consacré aux méthodes. Ces deux indices combinent les **mesures de température et d'humidité de l'air afin de cerner la température ressentie par les** individus et déterminer un niveau de confort. Malgré le fait que les résultats soient considérés comme un bon indicateur de la réalité et soient soutenus par des critères physiologiques objectifs, les indices restent un instrument basé sur des critères subjectifs. Mais il sera intéressant de voir si les résultats pour les deux écosystèmes différents que nous avons évalués, la forêt et le champ ouvert, permettront de conclure que nous sommes confrontés à des environnements dont les effets sur la santé ne sont pas identiques. Pour nos calculs, nous avons utilisé les mesures des maxima de température et nous les avons **combinés avec les mesures de l'humidité relative** correspondantes. Nos résultats représentent donc une situation extrême, soit le moment le plus chaud de la journée. Nous avons vu cependant dans le chapitre 3.4. que des maxima de la température exceptionnellement élevés **ne sont qu'un des facteurs d'une situation de canicule qui peuvent porter atteinte à l'équilibre physiologique des personnes. En effet, des températures nocturnes (minima) trop élevées ne permettant pas à l'organisme de récupérer sont également déterminantes, spécialement pour les catégories plus vulnérables (vieillards, nouveau-nés, etc.)** Mais puisque les indices que nous avons choisis pour cette étude ne donnent pas de résultats adéquats avec des températures basses, nous avons décidé de nous limiter au **moment le plus chaud. Pour cette même raison, nous n'avons pris en considération que les mesures des mois de juin, juillet et août.**

10.2. SITUATION GÉNÉRALE

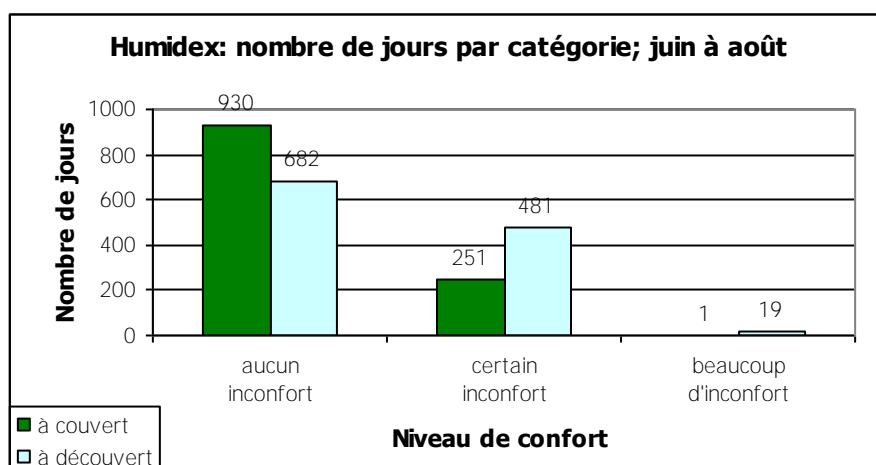
En utilisant l'indice THI, nous constatons pour toutes les stations que les 90 jours considérés ont une température ressentie allant du froid (THI entre -1.7 et 12.9) au très chaud (THI entre 26.5 et 29.9), avec une forte concentration de journées jugées chaudes et, dans une moindre mesure, confortables. Le graphique suivant montre cette distribution.

Fig. 10.1. Nombre total de jours par niveau de confort selon THI (juin - août 2003)

Source : Données LWF

Nous observons ainsi que, tant pour les stations de mesure sous couvert que pour les stations de mesure à champ ouvert, les maxima de température de la majorité de la période étudiée correspondent à une température ressentie chaude. Cependant, nous trouvons plus **de jours confortables en forêt qu'en dehors de la forêt et il y a plus de jours chauds voir très chauds à découvert que sous couvert forestier**. Dans un premier temps, nous pouvons donc confirmer notre hypothèse de base, soit que le climat de la forêt convient mieux au bien-être humain.

En utilisant l'indice Humidex, les résultats ne sont pas tout à fait identiques à ceux que nous venons de voir. Premièrement, la majorité des journées, toutes stations confondues, sont jugées cette fois-ci sans aucun inconfort (alors que THI les classait « chaudes »). Seules quelques stations se caractérisent par un climat très inconfortable. Tout de même, nous pouvons aussi constater une différence entre le niveau de confort de la température ressentie sous couvert forestier et à découvert : **comme avec l'indice THI, nous observons plus de jours sans aucun inconfort en forêt qu'en campagne. De plus, les journées classées dans la catégorie d'un « certain inconfort » ou même de « beaucoup d'inconfort » sont plus nombreuses en dehors de la forêt que sous couvert forestier**. La figure suivante montre cette répartition pour toutes les stations :

Fig. 10.2. Nombre total de jours par niveau de confort selon HUMIDEX (juin - août 2003)

Source : Données LWF

10.3. SITUATION PAR STATION

Nous avons du malheureusement écarter la station d’Isonne pour laquelle les données de la première semaine d’août sont trop clairsemées. Pour toutes les autres stations, qu’en est-il si nous les considérons séparément ? En fait, nous devons nuancer l’affirmation précédente, certaines stations présentant une situation plus favorable que d’autres. Par ailleurs, le classement des stations n’est pas le même avec les deux indices; généralement, elles sont situées dans des classes plus confortables avec Humidex comme nous pouvons l’observer dans le tableau suivant.

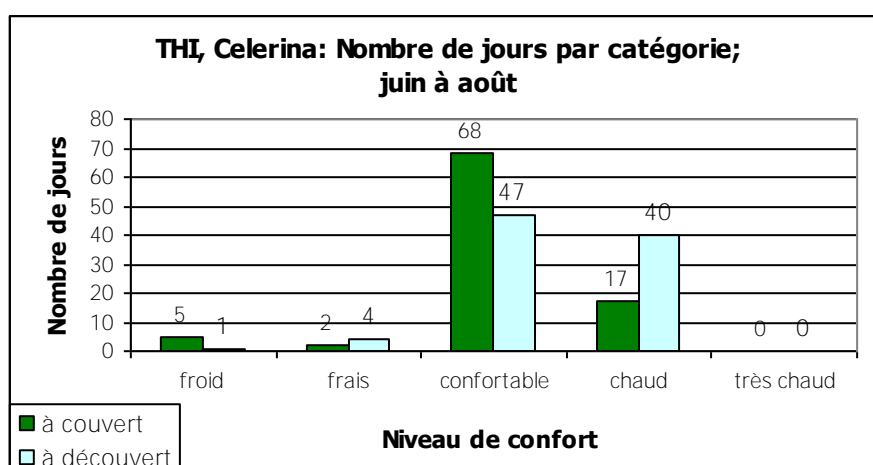
Fig. 10.3. : Répartition des station selon leur niveau de confort par indice (THI, Humidex, juin - août 2003)

| | Confortables sous couvert et à découvert | Confortables sous couvert ; inconfortables à découvert | Inconfortables sous couvert et à découvert | Inconfortables sous couvert et à découvert, et très inconfortables à découvert |
|---------|---|--|--|--|
| THI | Celerina Parc National | Beatenberg Bettlachstock Chironico | Lausanne Novaggio | Jussy Neunkirch Othmarsingen Schänis Vordemwald |
| Humidex | Beatenberg Bettlachstock Celerina Chironico Lausanne Parc National | Jussy Novaggio Vordemwald | | Neunkirch Othmarsingen Schänis |

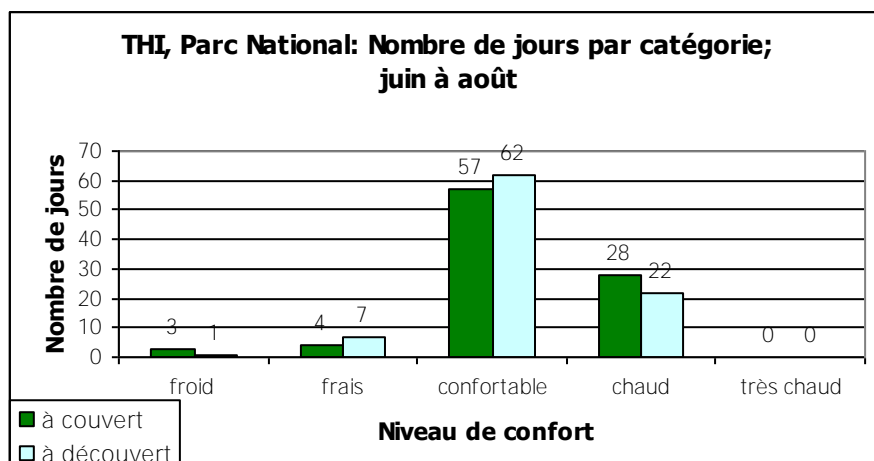
Examinons plus en détail ces quatre catégories pour les deux indices :

Premièrement, nous voyons que deux sites, Celerina et le Parc National, sont particulièrement confortables selon le THI; ils présentent tant à couvert qu’à découvert un plus grand nombre de journées confortables comme l’indiquent les tableaux ci-dessous :

Fig. 10.4. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Celerina (juin - août 2003)



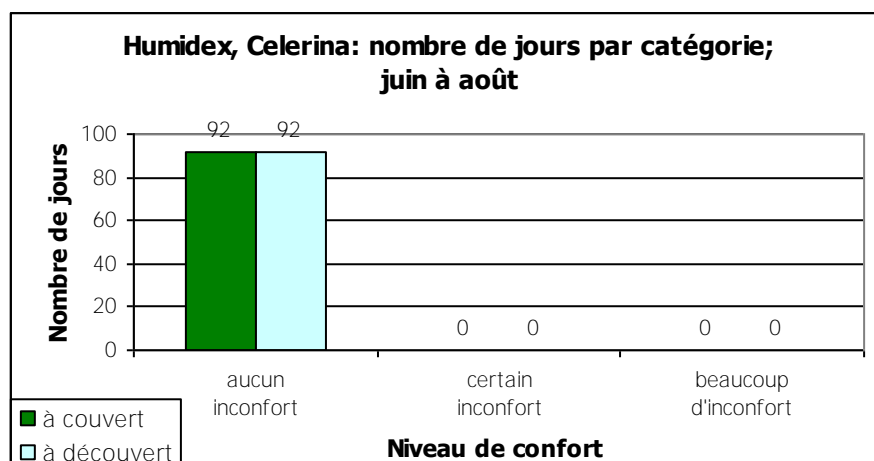
Source : Données LWF

Fig. 10.5. Nombre de jours par niveau de confort selon THI au Parc National (juin – août 2003)

Source : Données LWF

Nous pouvons observer cependant que ces deux stations présentent une différence notable : alors qu'à Celerina, les conditions climatiques sont encore plus confortables en forêt qu'à découvert, nous voyons qu'au Parc National, c'est le contraire qui se produit.

Comme nous le constatons dans le tableau 10.3., avec l'indice Humidex, le nombre de stations considérées comme confortables tant à couvert qu'à découvert est bien plus important qu'avec le THI (respectivement 6 et 2). Précisons simplement à ce sujet qu'une nuance est observable : l'indice Humidex n'indique « aucun inconfort » au Parc National et à Celerina pour la totalité des journées (contrairement à l'indice THI) tant sous couvert forestier qu'à découvert. Cela ressort clairement sur la figure 10.6.

Fig. 10.6. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex à Celerina (juin - août 2003)

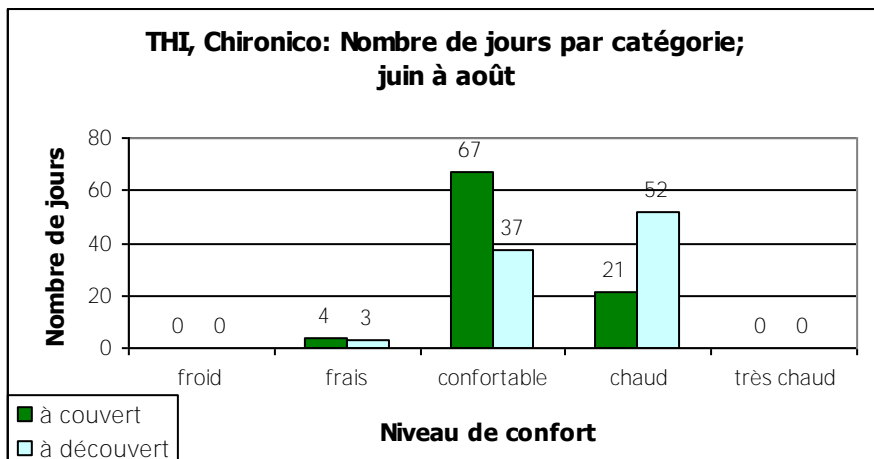
Source : Données LWF

Concernant les quatre autres stations (Beatenberg, Bettlachstock, Chironico et Lausanne), nous pouvons observer qu'elles sont classées dans la même catégorie (confortables tant à couvert qu'à découvert) avec Humidex, alors qu'avec le THI elles sont différenciées comme étant moins confortables.

Deuxièmement, un groupe de stations se distingue de la première catégorie par plus de jours confortables que de jours chauds sous couvert forestier et moins de jours confortables que de jours chauds à découvert. C'est-à-dire que le climat y est majoritairement confortable en forêt. Avec THI, il s'agit des stations de Beatenberg, de Bettlachstock et de Chironico,

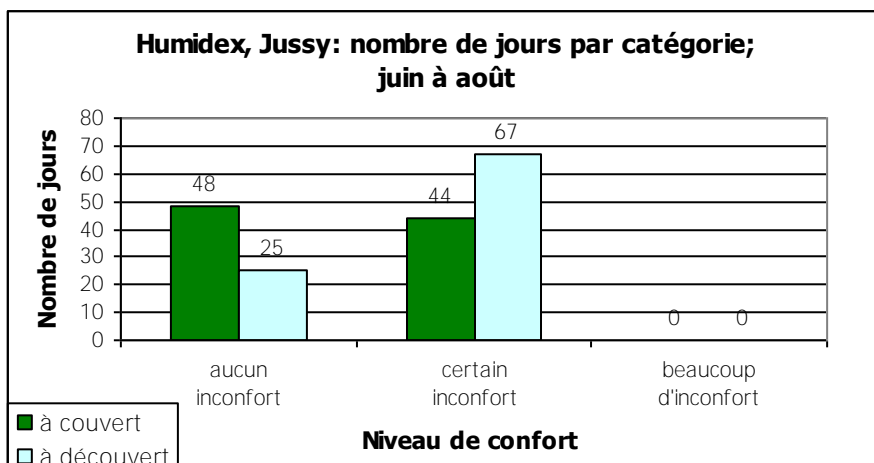
alors qu'Humidex y place d'autres stations (Jussy, Novaggio, Vordemwald). Les deux exemples suivants illustrent cette configuration :

Fig. 10.7. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Chironico (juin - août 2003)



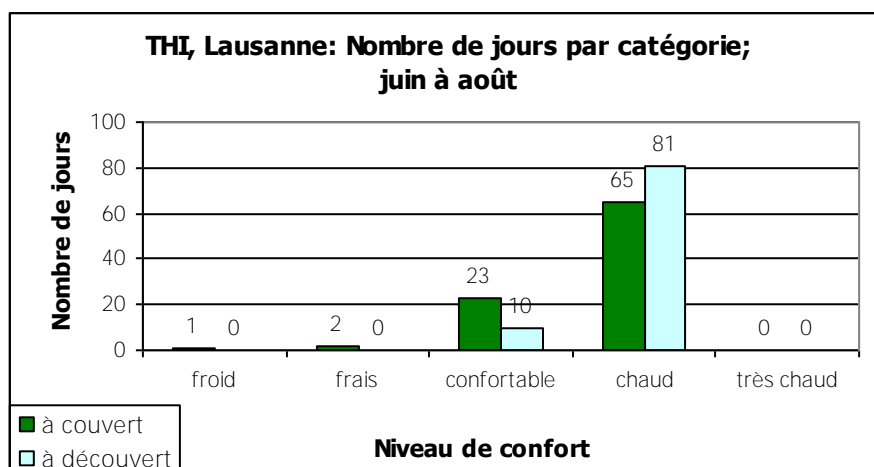
Source : Données LWF

Fig. 10.8. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex à Jussy (juin – août 2003)



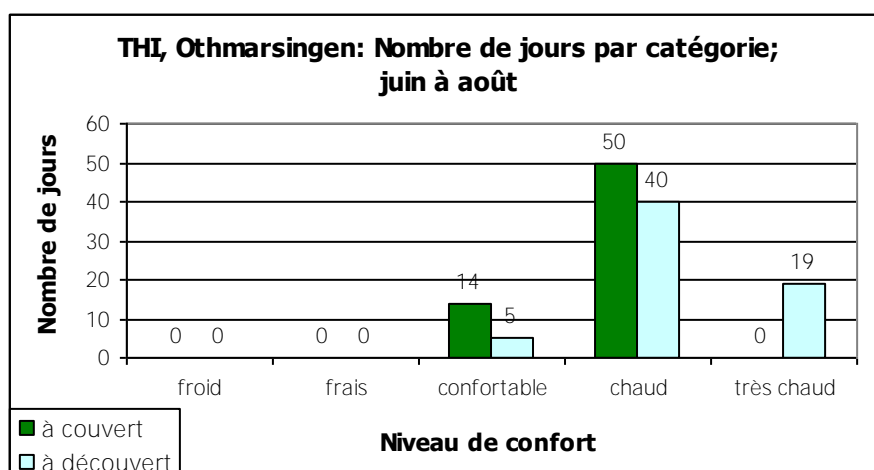
Source : Données LWF

Troisièmement, pour le THI, à Lausanne (représentée ci-dessous) et à Novaggio, nous pouvons observer une majorité de jours chauds tant en forêt qu'à ciel ouvert. Cependant, il y a toujours plus de journées confortables sous couvert forestier qu'à découvert. Ces deux sites correspondent au profil moyen de toutes les stations confondues pour ce même indice. Humidex, par contre, ne classe aucune station présentant ces caractéristiques.

Fig. 10.9. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Lausanne (juin et août 2003)

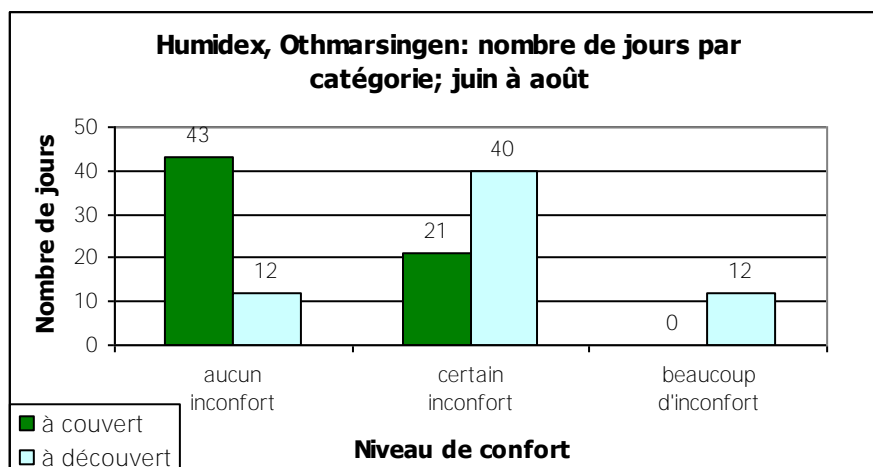
Source : Données LWF

Pour la dernière catégorie (inconfortables à couvert et à découvert, et très inconfortables à découvert), les deux indices placent les stations de Schänis, Neunkirch et Othmarsingen (Vordemwald et Jussy y figurent seulement d'après les résultats du THI). Dans ce cas, nous voyons qu'il y a plus de jours jugés confortables ou chauds sous couvert forestier qu'à découvert. La station qui a connu le plus grand nombre de journées très chaudes à découvert est celle d' Othmarsingen avec 19 jours selon THI et 12 selon Humidex (graphiques 10.10. et 10.11.). Cette station illustre bien les conditions particulières de l'été 2003 en plaine.

Fig. 10.10. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Othmarsingen (juin - août 2003)

Source : Données LWF

Fig. 10.11. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex à Othmarsingen (juin – août 2003)



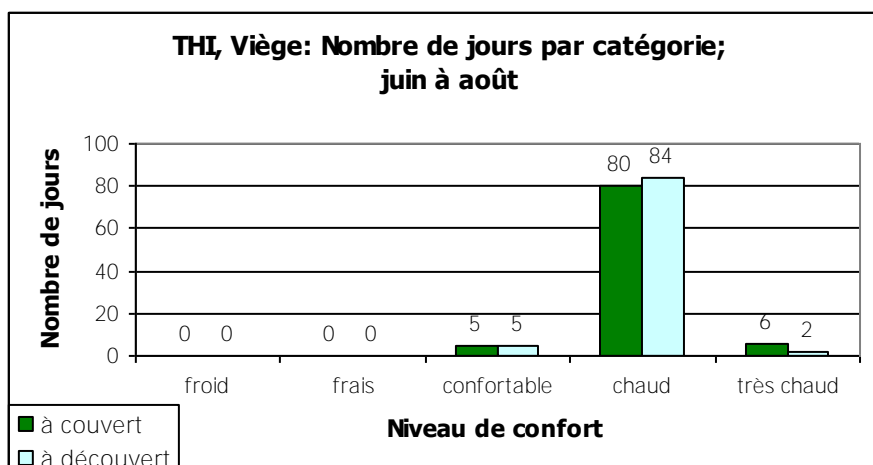
Source : Données LWF

Voyons maintenant le cas particulier du site de Viège :

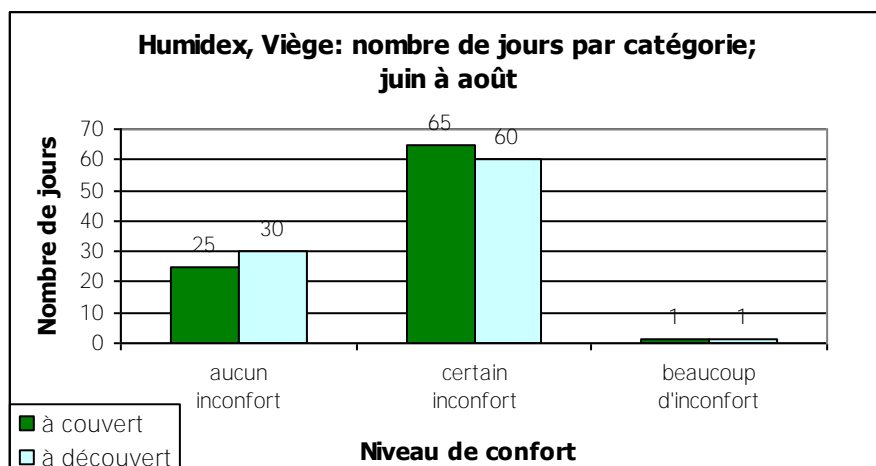
Dans la présentation des indices, nous avons mentionné le rôle déterminant de la température de l'air dans la définition du niveau de confort. De plus, nous avons pu observer que les différences de température entre la forêt et le champ ouvert mesurées à Viège et au Parc National présentent un profil tout à fait particulier. Cela est répercuté sur le niveau de confort, tant avec THI qu'avec Humidex. Cependant, comme nous l'avons déjà mentionné, le site du Parc National, grâce à l'altitude, est classé parmi les plus confortables.

A Viège, comme illustré ci-dessous, non seulement la tendance d'un climat plus confortable en forêt n'est pas vérifiée mais de plus, nous y observons des journées très inconfortables sous couvert forestier. Il s'agit du seul site de notre échantillon à présenter une telle distribution. Cependant, avec Humidex, une seule journée, tant en forêt qu'à champ ouvert, est présentée comme telle alors qu'avec THI, nous pouvons compter 6 journées « très chaudes » en forêt et 2 à découvert.

Fig. 10.12. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Viège (juin et août 2003)



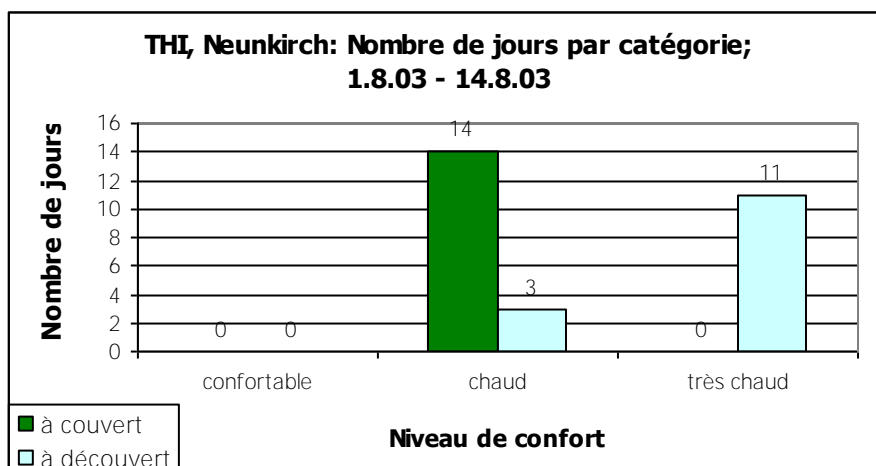
Source : Données LWF

Fig. 10.13. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex à Viège (juin et août 2003)

Source : Données LWF

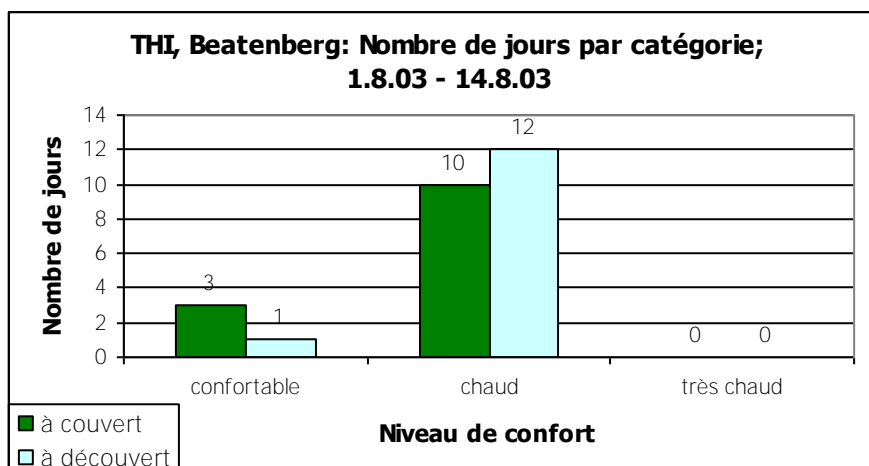
10.4. SITUATION DU 1 AU 14 AOÛT

Selon l'indice THI, si nous nous limitons dans notre analyse à la période du 1^{er} au 14 août 2003, nous pouvons constater que 72% (47/65) des jours « très chauds » à découvert se sont concentrés durant ces deux semaines. Nous remarquons également que pour l'ensemble des stations, seulement 3 jours confortables ont été enregistrés à ciel ouvert contre 12 en forêt. Ainsi, dans les stations qui se caractérisent par des journées « très chaudes », il n'y a aucune journée confortable ni en forêt ni à champ ouvert (A Viège, cela est encore plus prononcé avec 83% des journées les plus chaudes distribuées durant les deux premières semaines d'août). Pour illustrer ces propos, prenons les deux exemples de Neunkirch et de Beatenberg :

Fig. 10.14. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Neunkirch (1^{er} - 14 août 2003)

Source : Données LWF

Fig. 10.15. Nombre de jours par niveau de confort selon THI à Beatenberg (1^{er} - 14 août 2003)



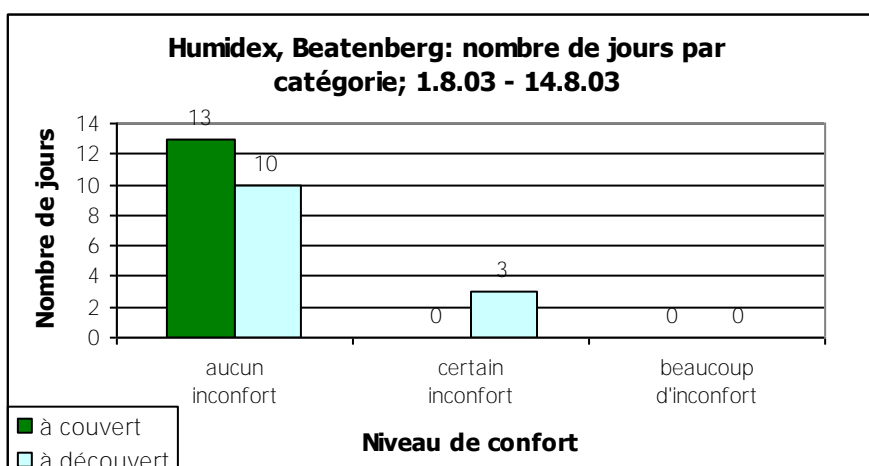
Source : Données LWF

La situation à Neunkirch se distingue par un nombre important de journées particulièrement **inconfortables en dehors de la forêt** et celle de Beatenberg illustre qu'en altitude, même pendant ces deux semaines particulièrement chaudes, des journées confortables ont pu être mesurées à découvert également.

Selon Humidex, la situation est similaire : cette période comprend 74% (14/19) des journées avec beaucoup d'inconfort à découvert mais, avec cet indice, plusieurs stations sont classées sans « aucun inconfort » même durant ces deux semaines de canicule. Nous avons choisi Beatenberg pour représenter cela. Ici encore, nous voyons clairement la moindre sensibilité de cet indice par rapport au THI.

Un résumé des résultats tant d'après le THI que Humidex est disponibles en Annexe 18 à 21.

Fig. 10.16. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex à Beatenberg (1^{er} - 14 août 2003)



Source : Données LWF

10.5. DISCUSSION ET CONCLUSION

Nous pouvons faire quelques déductions à partir des observations décrites jusque-là :

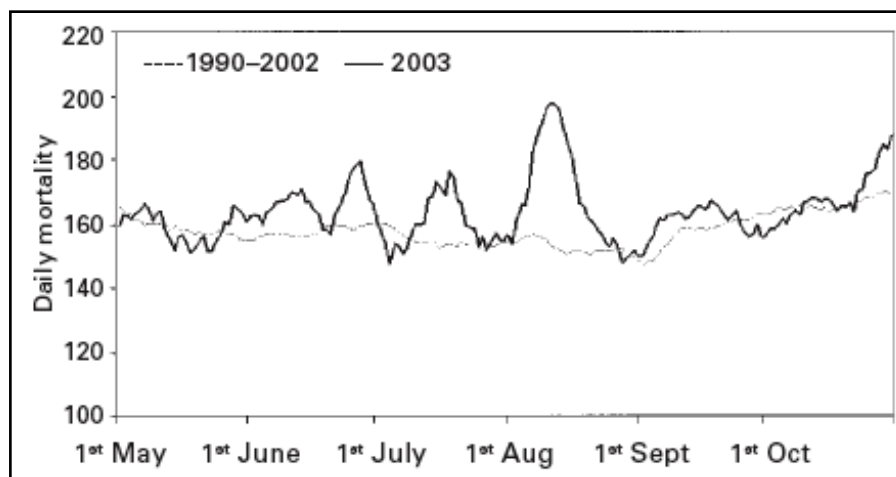
Premièrement, l'effet de l'altitude ressort nettement avec les deux indices. En effet, les sites de montagne (Beatenberg, National Park, etc.) se distinguent par un nombre plus important de journées confortables et même par certains après-midi frais ou froids, alors que les sites de plaine ont connu plus de journées dépassant le niveau de confort. **Sans surprise, l'altitude** est donc un facteur plus important que la présence ou non de formations forestières pour déterminer des conditions favorables à notre bien-être lors de fortes chaleurs. Ainsi, pendant **l'été**, ces deux éléments se combinent pour apporter davantage de confort (sauf au Parc National).

Deuxièmement, les deux indices bioclimatiques utilisés ne donnent pas tout à fait les mêmes résultats : Humidex indique moins de journées inconfortables que le THI. Citons à titre **d'exemple la situation à Lausanne le 19 août 2003** où, sous couvert forestier, la température maximale était de 22.62°C et l'humidité relative au même moment était de 53.56%. THI arrive à un indice de 20.52 ce qui correspond à **une journée chaude tandis qu'Humidex** indique 25.23, donc une journée sans « aucun inconfort ». Il en est de même à découvert.

Il y a également un plus grand nombre de journées « très chaudes » avec THI que de journées avec « **beaucoup d'inconfort** » pour l'indice Humidex (65 contre 19 à découvert). Ainsi, le 16 août 2003 à Othmarsingen à découvert, la température était de 33.98°C pour une humidité relative de 32.8%. Cela correspond à un THI de 26.74 soit à une journée « très chaude » **tandis qu' Humidex classe cette même journée dans la catégorie d'un « certain inconfort »**.

Malgré cela, les indices concentrent tous deux le plus grand nombre de journées très inconfortables durant les premiers 14 jours du mois d'août. C'est également à cette période que GRITZE et. al. (2005, p. 202) ont pu observer un pic important de la mortalité en Suisse, comme le montre le graphique suivant tiré de leur article.

Fig. 10.17. Courbe illustrant la mortalité en Suisse durant l'été 2003



Source : Gritze et. al. 2005 : 202

En conclusion, nous pouvons donc confirmer que le climat en forêt est en général plus confortable mais plusieurs éléments doivent être pris en compte pour nuancer cette affirmation :

Tout d'abord, comme nous l'avons relevé précédemment, l'altitude semble un facteur plus efficace. Ensuite, nous avons constaté que deux des sites géographiques étudiés présentent une situation inverse, ce qui correspond au point soulevé dans le chapitre des températures.

Pouvons-nous quand même conclure que la forêt offrait un rempart contre les fortes chaleurs durant l'été 2003 et particulièrement au début du mois d'août en plaine ?

En effet, pour le THI obtenu entre juin et août, les quatre stations de mesures qui se caractérisent par les écarts de température les plus significatifs connaissent également le plus grand nombre de journées confortables supplémentaires en forêt. Ainsi, à Bettlachstock où nous pouvons observer la différence la plus significative, nous comptons environ 30 jours de plus dans la catégorie « confortable » **sous couvert forestier qu'à découvert. Il en est de même pour Chironico, qui se caractérise également par une différence hautement significative entre la température maximale mesurée en forêt et celle mesurée à ciel ouvert. A Celerina finalement, il y a 20 journées « confortables » de plus en forêt. Là encore, Humidex se montre moins différencié. Tandis qu'à Bettlachstock nous pouvons également constater un surnombre conséquent de journées sans « aucun inconfort » sous couvert forestier, il n'y a aucune différence pour Chironico ou Celerina. De plus, alors que Beatenberg dont l'écart de température n'est que légèrement significatif, connaît tout de même 13 jours confortables de plus en forêt avec THI et 3 avec Humidex.**

Qu'en est-il si nous mettons cette constatation en lien avec la situation en ville ? Nous allons développer ce point au chapitre suivant.

11. DISCUSSION GÉNÉRALE

Que pouvons-nous déduire de nos résultats en prenant en compte simultanément ceux des différents paramètres météorologiques et ceux des indices bioclimatiques ? Dans ce chapitre nous tenterons de trouver une réponse à cette question. Nous examinerons plus particulièrement les deux points suivants : **tout d'abord, nous nous intéresserons à l'influence de l'humidité dans le résultat** des deux indices bioclimatiques et ensuite nous mentionnerons quelques points qui permettront de nuancer le résultat des indices.

Les deux indices que nous avons utilisés dans notre recherche combinent la température et l'humidité de l'air afin de déterminer le niveau de confort. Nous avons mentionné le rôle prépondérant de la température dans l'élaboration de ces indices, mais nos résultats montrent que **l'ordre des résultats des indices ne correspond pas tout à fait à l'ordre des mesures maximales de température. Nous trouvons également plusieurs exemples dans nos résultats où le niveau de confort est meilleur pour une température plus élevée mais combinée avec une humidité de l'air relative plus basse. Pour illustrer ce fait, nous avons choisi la situation observée à Neunkirch à découvert, basée sur les résultats de l'indice THI. Toutefois, les échantillons sont triés selon la température et nous pouvons ainsi constater qu'il y a des variations dans le niveau de confort pour des températures très similaires.**

Fig. 11.1. Influence de la température et de l'humidité de l'air sur le THI à Neunkirch à découvert

| Date | T° Max (°C) | Humidité de l'air (%) | THI | Niveau de confort |
|----------|-------------|-----------------------|-------|-------------------|
| 22.06.03 | 33.47 | 22.48 | 25.34 | Confortable |
| 25.06.03 | 33.83 | 34.76 | 26.86 | Chaud |
| 23.06.03 | 35.36 | 14.79 | 25.53 | Confortable |

Source : Données LWF

Nous avons vu que, sans faire l'unanimité des chercheurs, les définitions des canicules reposent souvent sur le critère de la température uniquement. Cependant, ces exemples nous montrent que **ce critère peut être nuancé en intégrant d'autres facteurs, tels que l'humidité de l'air dans notre cas.** Ce que font justement les indices hygrothermiques.

Dans le chapitre précédent, présentant les résultats des deux indices bioclimatiques, nous **avons pu observer une influence importante de l'altitude sur le nombre de jours** qui dépassent le niveau de confort ressenti comme agréable. Nous avons également vu un effet de la forêt sur le niveau de confort bioclimatique. Une remarque importante concernant les indices utilisés dans notre recherche doit être faite à ce stade. Les résultats que nous avons obtenus en appliquant les indices bioclimatiques **n'indiquaient** en effet que peu de journées comme particulièrement inconfortables. Ainsi, **avec le THI, aucune journée n'est qualifiée de « torride »** et seulement six stations sur 14 (Jussy, Othmarsingen, Schänis, Neunkirch, Viège, Vordemwald) ont connu des journées « très chaudes » pendant cette période. Les résultats d'**Humidex** sont encore plus étonnants: le service météorologique canadien déconseille les efforts seulement en cas de journées avec « **beaucoup d'inconfort** » et ce n'est que la **catégorie suivante qu'ils dénomment « danger »**. Ceci signifie que pendant l'été 2003 aucune de nos stations n'aurait connu de journées dangereuses pour la santé et il n'a été déconseillé de faire des efforts lors des maxima de température seulement pour 4 stations sur 14 (Neunkirch, Othmarsingen, Schänis, Viège) et cela seulement pendant 19 jours au total.

Cependant, dans le chapitre introductif, nous avons parlé de la situation météorologique **particulière de l'été 2003**. En Suisse notamment, divers records ont été mesurés. Ainsi, entre juin et août, les moyennes journalières ont dépassé les mesures normales des autres étés de 4.0 °C à 5.5 °C. Deuxièmement, la température maximale la plus élevée depuis 1864 a été mesurée à Grono (41.5°). GRITZE et. al., (2005) ont de plus montré que la Suisse a connu une surmortalité conséquente au début du **mois d'août**. Alors pourquoi les indices, et **particulièrement Humidex, n'indiquent-ils pas plus de jours inconfortables, voir même dangereux pour la santé, au moins à découvert ?**

Un premier élément **pourrait être l'emplacement de nos stations qui se trouvent très largement dans des milieux ruraux**. Or, plusieurs auteurs dont le bioclimatologue J.P. Besançon (BESANÇENOT, 2002) insistent sur le caractère urbain de la surmortalité qui est observée avant **tout dans les grandes agglomérations**. Afin d'examiner de plus près le rôle joué par le microclimat urbain, nous avons calculé les deux indices bioclimatiques, THI et Humidex, avec des données de MétéoSuisse pour quelques agglomérations importantes. Nous avons choisi des villes qui nous permettent des comparaisons avec quelques-unes de nos stations de mesure : Genève, Pully et Viège. Et nous avons également utilisé les **données de Berne, Bâle et Lugano pour une comparaison plus générale**. Il est évident qu'une comparaison entre ces deux échantillons **ne peut rester qu'approximative** du fait que les instruments de mesure utilisés ne sont pas identiques.

Tout d'abord, nous pouvons constater dans les centres urbains que les indices bioclimatiques utilisés dans notre recherche ne caractérisent aucune journée de « torride » pour le THI ou de « dangereuse » dans le cas d'Humidex. Plus surprenant, les résultats d'Humidex n'indiquent des journées avec « beaucoup d'inconfort » que pour les villes de Lugano et de Bâle.

Avec le THI, la situation que nous retrouvons à Bâle et à Lugano est comparable à celle **observée à Neunkirch, Schänis ou Othmarsingen pour le début du mois d'août avec 9 à 11 jours considérés comme « très chauds »**. Humidex de son côté **n'indique un nombre important de journées avec « beaucoup d'inconfort » que pour Lugano (7) et pour Othmarsingen (9)**. Si nous comparons les résultats de Genève avec ceux obtenus à Jussy, il apparaît que le nombre de journées « très chaudes » avec le THI entre le 1^{er} et le 14 août est similaire pour la ville de Genève et la station à champs ouvert de Jussy (6 à Genève et 7 à Jussy). Il en est de même pour Humidex qui classe la totalité des journées du début du **mois d'août comme étant d'un « certain inconfort »**. Dans ce cas, nous ne pouvons donc pas observer de différence, mais il faut souligner que Jussy fait partie de l'agglomération genevoise et que la station de MétéoSuisse est placée à l'aéroport de Genève, ce qui réduit évidemment l'intérêt de la comparaison. Par contre, entre la station de mesure LWF en-

dessus de Lausanne et celle de MétéoSuisse à Pully, nous pouvons observer une légère **différence**. En fait, le THI n'indique aucune journée « très chaude » au nord de Lausanne, mais quatre à Pully pendant la même période. Humidex ne détecte de nouveau aucune journée avec « **beaucoup d'inconfort** » dans les deux sites. A Viège finalement, nous ne pouvons pas constater de différence, **ce qui n'est pas surprenant puisque notre station à découvert est placée à proximité de celle de MétéoSuisse (REBETEZ et LOGEAY 2000)**.

Les résultats mesurés à Bâle, Genève ou Lugano sont comparables à ceux de certaines stations LWF, notamment celles qui se caractérisent également par un nombre particulièrement important de journées « très chaudes ». **D'autres stations LWF ou la ville de Berne s'avèrent avoir un climat plus frais. Cependant, même dans les villes les plus chaudes**, les indices bioclimatiques ne nous indiquent pas des journées dangereusement chaudes et humides qui expliqueraient à eux seul la surmortalité. Il nous semble que les résultats obtenus grâce aux indices bioclimatiques **sous-estiment l'impact sur le bien-être et la santé humaine. Il doit donc y avoir d'autres facteurs qui interviennent**.

En effet, des recherches ont montré que la mortalité observée par exemple à Athènes en **juillet 1987 ne peut ni s'expliquer uniquement par la température et l'humidité de l'air ni uniquement par la pollution (BESANÇENOT, 2002)**. Il semblerait que ces deux phénomènes **ne s'ajoutent pas uniquement l'un à l'autre mais qu'ils agissent en synergie**. Afin de pouvoir déterminer le niveau de confort lors de périodes particulièrement chaudes, ce phénomène **observé dans le cadre de la mortalité nous montre qu'il est d'une grande importance de s'intéresser non seulement au climat mais également au niveau de pollution atmosphérique. Ce n'est qu'en considérant l'environnement dans son ensemble que nous pouvons avoir une conception profonde du bien-être**.

De plus, comme nous l'avons déjà mentionné, les indices ont été élaborés de façon expérimentale en se basant sur la sensation d'inconfort d'un échantillon de sujets et ils sont donc représentatifs avant tout pour les personnes correspondant à cet échantillon. C'est-à-dire des adultes en bonne santé. Or, nous avons également montré que le risque de **ressentir de l'inconfort dû à la chaleur n'est pas le même pour tout le monde**. Le niveau de confort indiqué par ces indices peut ne pas être adapté aux groupes les plus vulnérables tels que les personnes âgées, les personnes qui souffrent de maladies cardiovasculaires ou de maladies psychiques ou encore la population de faible niveau socio-économique. Ceci est **pourtant paradoxal puisque tant le THI qu'Humidex ont été élaborés afin d'avertir la population des dangers éventuels présentés par les paramètres météorologiques**. Or, ils semblent sous-estimer ce danger pour les populations les plus gravement touchées.

Finalement, comme nous l'avons vu, la définition d'une canicule est complexe, elle doit prendre en compte d'autres éléments avec la température maximale comme par exemple la température minimale qui permet ou non un certain repos pendant la nuit, le nombre de journées consécutives **de chaleur exceptionnelle ou encore le moment dans l'année durant lequel survient la canicule**.

QUATRIEME PARTIE

CONCLUSION

12. CONCLUSION

Nous sommes arrivés au terme de notre recherche. Quatre points composent cette conclusion : **tout d'abord, nous nous interrogeons sur la pertinence de nos résultats pour** répondre au mieux à notre question de départ, ensuite nous mettons en évidence les points plus surprenants et les nuances apportées par les résultats de notre recherche ou liées aux méthodes utilisées. Finalement nous réfléchissons aux différentes pistes soulevées par cette **étude et qui pourraient faire l'objet d'un approfondissement ou d'une recherche particulière.**

12.1. QUELLE EST LA RÉPONSE À NOTRE QUESTION DE DÉPART ?

Nous sommes partis de la question suivante : La forêt peut-elle, grâce à son climat particulier, avoir un effet bénéfique sur le bien-être humain lors de périodes particulièrement chaudes ? **Pour répondre à cette question nous avons tout d'abord formulé les hypothèses** suivantes basées sur la comparaison du climat sous couvert forestier et à découvert :

Le microclimat dans la forêt est plus tempéré que le climat en dehors de la forêt. Pour les maxima de température, cette hypothèse est confirmée pour toutes les stations de mesures sauf pour Viège et pour le Parc National où le microclimat en forêt est même moins tempéré. Par contre, **elle ne l'est que partiellement en ce qui concerne les minima de température et l'humidité de l'air relative en général, nous avons pu constater** des différences statistiquement significatives seulement pour une partie de nos stations. Pour ces paramètres, la situation semble donc être comparable entre le climat sous couvert forestier et celui en dehors de la forêt. L'analyse du PAR nous permet de vérifier l'impact de l'apparition des feuilles à la fin du mois d'avril dans les forêts de feuillus, et relève également la situation particulière des forêts de pins. Par contre, elle ne nous permet pas **d'établir clairement un lien avec les différences** de température observée. Quant au vent, nous avons effectivement constaté un effet modérateur de la forêt, malheureusement la **faiblesse des valeurs de ce paramètre durant l'été 2003 ne permettait pas de pousser l'analyse plus loin.**

La différence entre le climat à couvert et à découvert est plus prononcée pendant des périodes particulièrement chaudes. Nos résultats permettent de corroborer cette hypothèse **par l'analyse de corrélation que nous avons faite entre les écarts de température observés et** la température mesurée à découvert. En outre, les différences de température constatées entre les deux écosystèmes sont plus importantes pour la période de juin à août 2003 et plus particulièrement entre le 1^{er} et le 14 août.

Nous avons ensuite formulé l'hypothèse suivante mettant en lien la question de la particularité du climat forestier et la notion de confort humain :

Le climat tempéré de la forêt a un effet positif sur le bien-être humain pendant les périodes particulièrement chaudes. Cette hypothèse peut également être confirmée sous quelques réserves. En effet, nous pouvons constater un climat plus confortable au moment de la température maximale pour toutes les stations sauf pour Viège et pour le Parc National. Cette hypothèse est de plus renforcée par la probable sous-estimation par les indices utilisés **de l'impact de ce que l'on qualifie de canicule. En effet, ceux-ci ne considèrent pas tous les** facteurs à risques ; **le climat n'est qu'un facteur parmi d'autres qui ont une influence sur le** sensation de bien-être.

12.2. QUELS SONT LES ÉLÉMENTS SURPRENANTS DE NOTRE RECHERCHE ET CEUX QUI RELATIVISENT NOTRE QUESTION DE DÉPART ?

Nous avons confirmé que le microclimat de la forêt est particulier, comparé au climat observé dans un champ avoisinant. Cependant, nous avons également pu constater que **cette particularité varie considérablement d'une forêt à l'autre. Nous avons en effet pu trouver des différences importantes entre les stations pour les paramètres météorologiques que nous avons examinés.** Il nous semble ainsi plus adapté de parler *des microclimats forestiers* et non pas *du microclimat forestier*.

Une différence remarquable est celle concernant la partie du PAR qui parvient jusqu'au sol sous couvert forestier : alors que dans les trois forêts composées de différentes espèces de pin, seule une faible partie du PAR est absorbée par les arbres, plus du 90% l'est dans d'autres types de forêt. De même, nous avons pu observer que, bien que la température maximale soit généralement moins élevée sous couvert forestier, ce n'est pas toujours le cas. Au Parc National, d'avril à octobre, et à Viège pendant les trois mois estivaux les températures maximales sont même légèrement plus importantes en forêt. Or, ces deux forêts sont justement composées de pin. Ainsi, comme nous l'avons souligné précédemment, l'espèce concernée semble jouer un rôle dans l'importance des écarts entre climat à couvert et à découvert. En effet, les hêtraies présentent des écarts plus prononcés que des forêts composées d'espèces héliophiles (chênaies, pinèdes).

Nous devons également souligner ici l'incidence sur les résultats que peut avoir l'emplacement des stations. L'exemple de Viège et celui de Novaggio illustrent bien l'impact que cela peut avoir sur les mesures obtenues : à Novaggio, la station à découvert se trouve au bord d'une clairière, ce qui influence manifestement une partie du rayonnement à découvert. Quant à Viège, les deux stations ne se trouvent pas dans un milieu similaire, celle sous couvert étant située sur une pente alors que celle à découvert se trouve au fond de la vallée. Cependant, d'autres stations comme celle de Jussy par exemple sont également placées dans des clairières sans que nous ayons pu constater d'effet perturbateur et la situation à Viège est exceptionnelle également par sa composition végétale. De plus, la comparaison entre la situation en forêt et à un champ ouvert nous montre également que la forêt a un effet positif sur le confort ressenti.

L'application du THI et de Humidex, les deux indices bioclimatiques que nous avons utilisés dans notre recherche et qui combinent la température avec l'humidité de l'air relative afin de pouvoir déterminer le niveau de confort d'une situation météorologique particulière, nous ont montré que le niveau de confort est avant tout dépendant de l'altitude : les stations de mesures en montage comprenant moins de journées inconfortables que sur le plateau. Ainsi, les stations de Viège et du Parc National, qui sont les deux seules stations où les maxima de température étaient plus élevés en forêt, présentent une situation bioclimatique opposée : Viège est en effet la seule station qui a connu des journées « très chaudes » selon THI ou avec « beaucoup d'inconfort » selon Humidex sous couvert forestier alors que le Parc National bénéficie d'une situation bioclimatique confortable grâce à l'effet de l'altitude.

Nous avons également montré que les deux indices ont tendance à sous-estimer le niveau d'inconfort notamment pour la population la plus vulnérable aux dangers de la chaleur excessive. Ils ne tiennent notamment pas compte de la pollution de l'air, un phénomène qui aggrave fortement les risques. De plus, nous avons constaté des variations notables entre les deux indices. De manière générale, THI indique un climat nettement plus inconfortable qu'Humidex. Ceci montre bien que les résultats obtenus en utilisant les indices bioclimatiques doivent être interprétés avec précaution même s'ils fournissent des indications utiles.

12.3. QUELLES SONT LES APPLICATIONS POSSIBLES DES RÉSULTATS D'UNE TELLE DÉMARCHE?

Nous avons évoqué précédemment que notre recherche s'inscrit dans le débat posé par la notion de multifonctionnalité de la forêt, dont le but est de contribuer à l'effort d'estimation de la valeur *pécuniaire* de ses différentes fonctions. Parmi les biens et services rendus, figure l'effet modérateur des variations climatiques. Dans ce cadre-là, nous voulions mettre en évidence la fonction protectrice de la forêt face aux canicules, un des effets négatifs du réchauffement climatique. D'autant plus, que celles-ci seront très probablement plus fréquentes. Jusqu'à présent, la littérature qui traite des conséquences sanitaires de périodes extrêmement chaudes n'a pas insisté sur le rôle potentiel des arbres et a mis l'accent sur la nécessité de développer les systèmes de climatisation (ABENHAIM, 2003, pp. 145-151 ; NAUGHTON, 2002). Sans vouloir nier ses effets positifs, il nous semble pourtant que la climatisation ne peut pas être la seule solution et encore moins à long terme pour différentes raisons : tout d'abord, elle repose sur l'utilisation d'énergie et il nous paraît peu raisonnable de la proposer comme unique solution alors que nous nous attendons à une pénurie de ces énergies dans un futur plus ou moins proche. De plus, tout en refroidissant à l'intérieur, le moteur qui actionne la climatisation fabrique de la chaleur excédentaire à l'extérieur. Une utilisation globale de la climatisation ne ferait donc pas baisser la température environnante, au contraire cela contribuerait davantage au réchauffement planétaire. La prise de conscience écologique fait également que de plus en plus de personnes favorisent des réponses plus douces aux défis auxquels notre société doit faire face. C'est ici que la forêt peut jouer un rôle important, dans le cadre de la climatothérapie notamment. Ce concept de forêts thérapeutiques est présenté notamment dans la brochure intitulée « Wald und Gesundheit » publiée par la fondation « Promotion Santé Suisse » et par SILVIVA. L'aménagement de ces forêts devrait répondre aussi aux besoins curatifs de ces lieux. Nos résultats concernant les différents microclimats que l'on peut trouver en forêt ainsi que leurs impacts sur le bien-être humain pourraient être utiles dans ce cadre-là. Bien que nous ayons montré que l'altitude offre un refuge certain face à la chaleur étouffante des grandes agglomérations sur le plateau, nous avons également démontré que certains endroits permettent un soulagement encore plus important si combiné avec un type de forêt appropriée. Par conséquent, il faudrait plutôt préférer les hêtraies aux chênaies et éviter les pinèdes. Il semblerait également raisonnable de favoriser la croissance des forêts de hêtres ainsi que d'y aménager des abris de la chaleur. Malheureusement, nous savons que le réchauffement climatique aura pour conséquence de diminuer la niche écologique de cette espèce.

Sans aller jusqu'à envisager la création de forêts thérapeutiques, nos résultats nous permettent-ils de conseiller aux personnes de se rendre en forêt lors de moments particulièrement chauds ? C'est bien le cas ; l'exemple de Jussy nous montre bien qu'une forêt à proximité d'un grand centre urbain – Genève en l'occurrence – se caractérise par un niveau d'inconfort moins oppressant que la ville. De plus, la recherche de Naughton (NAUGHTON et. al., 2002) a démontré que les personnes plus casanières constituent un groupe à risques. Si le simple fait de quitter son appartement a déjà un effet positif sur la santé, le quitter afin de se rendre en forêt augmente donc l'impact positif.

Nos résultats permettent donc tout à fait de montrer l'importance de valoriser la forêt pour cette fonction-là. Malheureusement, la forêt n'est pas facilement accessible à tous. C'est le cas d'une partie de la population vulnérable, spécialement les personnes âgées, qui ne peuvent facilement se déplacer en forêt ou encore des femmes qui s'y sentent pas en sécurité (WILD-ECK, 2002).

12.4. QU'EST-CE QUI POURRAIT ÊTRE FAIT POUR COMPLÉTER NOTRE RÉPONSE?

Il est évident que l'exceptionnalité de l'été 2003 pourrait être mieux perçue lorsque les données des 14 stations de mesures LWF seront examinées pendant plusieurs années. Ce qui permettra de comparer nos résultats avec la situation d'étés « normaux » ainsi qu'avec les autres saisons. Les analyses de la situation climatique à couvert et à découvert à Beatenberg ont déjà montré que les écarts de température sont encore plus importants en hiver qu'en été (V.Renaud, projet de thèse en cours). Il sera intéressant de voir si ces résultats se confirment pour les autres stations. De plus, l'été 2003 étant également considéré comme particulièrement sec (REBETEZ et al., 2006), il sera enrichissant de comparer les indices bioclimatiques obtenus pour cette période avec ceux d'une période moins chaude mais plus humide par exemple.

Dans notre recherche, nous avons abordé seulement la question du climat urbain, qui n'est pas moins fondamentale dans le cadre de cette problématique. Ainsi, les recherches de Besançonot notamment (BESANÇENOT, 2002) ont affirmé que les problèmes sanitaires liés aux canicules sont plus aigus dans les grandes agglomérations que dans un milieu rural. Dans cette optique, une étude de l'influence des forêts urbaines pourrait se révéler utile d'autant plus que ce sont ces milieux-là qui sont les plus accessibles à la majorité des habitants. Il y a d'ailleurs toute une branche de la microclimatologie forestière qui s'intéresse à cette question. On pourrait citer l'article rédigé par Oke, Crowther, McNaughton, Monteith et Gardiner intitulé « The Micrometeorology of the Urban Forest » (OKE et al., 1989), celui publié par McPherson, Nowak, Heisler, Grimmond, Souch, Grant and Rowntree intitulé « Quantifying urban forest structure, function and value : the Chicago Urban Forest Climate Project » (MCPHERSON et al., 1997) ou encore celui de Spronken-Smith et Oke, « The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates » (SPRONKEN-SMITH AND OKE, 1998).

Enfin, certains éléments méritent plus d'attention que ce que nous leur avons accordés. Ainsi, nous avons mentionné que le niveau d'inconfort n'est pas seulement lié aux aspects météorologiques mais également à ceux de la pollution de l'air. De plus, une analyse du LAI (Leaf Area Index) donnera des informations plus complètes sur la densité des canopées de nos différentes stations d'observation. En outre, des données supplémentaires telles que celles de l'humidité absolue ou du rayonnement global permettraient une compréhension plus profonde des différences climatiques entre ces deux écosystèmes. Par exemple, certaines comparaisons pourraient être faites avec l'humidité absolue afin de mettre en évidence le rôle de l'évapotranspiration sur les différences de température. Nous avons également traité de façon très superficielle l'influence du type de sol sur les différents microclimats. Enfin, il serait imaginable de faire des analyses beaucoup plus fines au niveau de chaque station. Ce qui permettrait par exemple de prendre en compte la situation météorologique quotidienne afin, notamment, d'inclure les différences de nébulosité.

En conclusion, pour répondre à notre question de départ, nous pouvons donc affirmer que la forêt a un microclimat particulier qui est souvent plus tempéré que celui observé en dehors de la forêt. Cependant une réserve doit être faite quant à l'influence des forêts de pin qui peuvent se caractériser par un climat plus extrême en forêt. Les stations se distinguant par un microclimat plus tempéré, le sont d'autant plus lorsqu'il fait particulièrement chaud comme c'était le cas en été 2003. Les différents microclimats trouvés en forêt ont donc un effet plus ou moins positif sur le bien-être humain à l'exception des pinèdes de Viège et du Parc National (encore que celui-ci soit de toute façon confortable grâce à l'effet de l'altitude). Cependant, les paramètres météorologiques ne constituent qu'un aspect parmi d'autres de l'influence de la forêt sur la santé, qui, en outre, n'est disponible que pour certains groupes de la population.



« Les forêts et les arbres sont les plus grands présents dont la nature à gratifié l'homme. »
Pline L'Ancien (I^{er} siècle ap. J.-C.)

Bibliographie

- Abenheim, L.** 2003: *Canicules. La santé publique en question*. Paris: Fayard.
- Agostini, G., Pinna, M., Pinna, S. e Russo, F.** 2005: *Bioclimatologia umana*. Torino: UTET Libreria.
- Aussenac, G.** 2000: Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science* 57. 287-301.
- Bader, S.** 2004 : *Die extreme Sommerhitze im aussergewöhnlichen Witterungsjahr 2003*. Zürich: MétéoSuisse.
- Besaçonot, J.-P.** 2002: Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environnement, Risques et Santé* 1 (4). 229-240. (<http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/print/e-docs/00/01/FB/EF/article.md>).
- Besaçonot, J.-P.** 2001: *Climat et santé*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Brockhaus Enzyklopädie**, 2001, Band 14. Leipzig, Mannheim: F.A. Brockhaus. p.562.
- Brockhaus Enzyklopädie**, 2001, Band 21. Leipzig, Mannheim: F.A. Brockhaus. pp. 215-216.
- Bundesamt für Landestopographie** 2000: SwissMap50, Die Landeskarte der Schweiz. Version sur CD.
- Carlson, D.W.** and **Groot, A.** 1997: Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 87. 313-329.
- Chen, J., Franklin** and **J.F., Spies, T.A.** 1993: Contrasting microclimates among clearcut, edge, and interior of old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 63. 219-237.
- Conti, S., Meli, P., Minelli, G., Solimini, R., Toccaceli, V., Vichi, M., Beltrano, C.** and **Perini, L.** 2005: Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental Research* 98. 390-399.
- Davies-Colley, R.J., Payne, G.W.** and **van Elswijk, M.** 2000: Microclimate gradients across a forest edge. *New Zealand Journal of Ecology* 24 (2). 111-121.
- Dessai, S.** 2002: Heat stress and mortality in Lisbon Part I. model construction and validation. *International Journal of Biometeorology* 47. 6-12.
- Dessai, S.** 2003: Heat stress and mortality in Lisbon Part II. An assessment of the potential impacts of climate change. *International Journal of Biometeorology* 48. 37-44.
- Donaldson, G.C., Keatinge, W.R.** and **Näyhä S.** 2003: Changes in summer temperature and heat-related mortality since 1971 in North Carolina, South Finland, and Southeast England. *Environmental Research* 91. 1-7.
- Donley, T.J.** and **Sheridan, S.C.** 2006: The relationship between extreme heat and ambulance response calls for the city of Toronto, Ontario, Canada. *Environmental Research* 101. 94-103.
- Durand-Dastès, F.** 1969: *Géographie des airs*. Paris : Presses Universitaires de France.

- El-Zein, A., Tewtel-Salem, M. and Nehme, G.** 2004: A time-series analysis of mortality and air temperature in Greater Beirut. *Science of the Total Environment* 330. 71-80.
- Fitzjarrald, D., Acevedo, O.C. and Moore, K.E.** 2001: Climatic Consequences of Leaf Presence in the Eastern United States. *Journal of Climate* 14 (4). 598-614.
- Flemming, G.** 1994: *Wald, Wetter, Klima. Einführung in die Forstmeteorologie*. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- Fouillet, A., Rey, G., Laurent, F., Pavillon, G., Bellec, S., Guihenneuc-Jouyaux, C., Clavel, J., Jougla, E. and Hémon, D.** 2006 : Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 80. 16-24.
- Geiger, R., Aron, R.H. and Todhunter, P.** 2003: *The Climate Near the Ground*. Lanham, Maryland: Rowman & Littlefield Publishing Group, sixth edition.
- Givoni, B.** 1978 : *L'homme, l'architecture et le climat*. Paris : Editions du Moniteur.
- Gregorczyk, M. and Cena, K.** 1967: Distribution of effective temperature over the surface of the earth. *International Journal of Biometeorology* 11 (2). 145-149.
- Grimmond, C.S.B., Robeson, S.M. and Schoof, J.T.** 2000: Spatial variability of micro-climatic conditions within a mid-latitude deciduous forest. *Climate Research* 15. 137-149.
- Grize, L., Huss, A., Thommen, O., Schindler and C., Braun-Fahrländer, C.** 2005: Heat wave 2003 mortality in Switzerland. *Swiss Medical Weekly* 135. 200-205.
- Holst, T., Rost, J., Schindler, D., Matzarakis, A. und Mayer, H.** 2000: Mikroklimatische Untersuchungen in südwestdeutschen Buchenbeständen. *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg* 5. 123-135.
- Kyselý, J.** 2004: Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic. *International Journal of Biometeorology* 49. 91-97.
- Lee, R.** 1978: *Forest microclimatology*. New York: Columbia University Press.
- Lützke, R.** 1967: Die Luftfeuchtigkeit im Walde im Vergleich zur offenen Feldflur. *Archiv für Forstwesen* 16 (6/9). 629-633.
- Lützke, R.** 1961: Das Temperaturklima von Waldbeständen und -lichtungen im Vergleich zur offenen Feldflur. *Archiv für Forstwesen* 10 (1). 17-83.
- Masterson, J.M. and Richardson, F.A.** 1979: *A method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity*. Downsview, Ontario: Environment Canada.
- Mayer, H.** 2004 : *Skript zum Vertiefungsblock „Forstliche Meteorologie“*. Freiburg: Meteorologisches Institut der Universität Freiburg.
- McPherson, G.E., Nowak, D., Heisler, G., Grimmond, S., Souch, C., Grant, R. and Rowntree, R.** 1997: Quantifying urban forest structure, function, and value: the Chicago Urban Forest Climate Project. *Urban Ecosystems* 1. 49-61.

- Mitscherlich, G.** 1981: *Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstum. 2. Band: Waldklima und Wasserhaushalt.* Frankfurt am Main: J.D. Sauerländerverlag, zweite, überarbeitete Auflage.
- Morecroft, M.D., Taylor, M.E. and Oliver, H.R.** 1998: Air and soil microclimates of deciduous woodland compared to an open site. *Agricultural and Forest Meteorology* 90. 141-156.
- Müller-Benedict, V.** 2006: *Grundkurs Statistik in den Sozialwissenschaften.* Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, dritte Auflage.
- Naughton, M.P., Henderson, A., Mirabelli, M.C., Kaiser, R., Wilhelm, J.L., Kieszak, S.M., Rubin, C.M. and McGeehin, M.A.** 2002: Heat-Related Mortality During a 1999 Heat Wave in Chicago. *American Journal of Preventive Medicine* 22 (4). 221-227.
- Oke, T.R.** 2000: *Boundary Layer Climates.* London: Routledge, second edition.
- Oke, T.R., Crowther, J.M., McNaughton, K.G., Monteith, J.L. and Gardiner, B.** 1989: The Micrometeorology of the Urban Forest (and Discussion). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 324 (123). 335-349.
- Pavari, A.** 1962. *L'influenza delle foreste sull'ambiente.* Roma: FAO.
- Piéry, M., Milhaud, M. et Van der Elst, R.** 1934: *Traité de climatologie biologique et médicale.* Paris : Masson.
- Potter, B. E., Teclaw, R.M. and Zasada, J.C.** 2001: The impact of forest structure on near-ground temperatures during two years of contrasting temperature extremes. *Agricultural and Forest Meteorology* 106. 331-336.
- Rebetez, M. et Logeay, G.** 2000 : Etude comparative de données enregistrées par les stations météo LWF et MétéoSuisse à Reckenholz et à Viège. Lausanne : Rapport LWF.
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Dropp, J.P. and Menzel, A.** 2006: Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Annals of Forest Science* 63. 569-577.
- Rebetez, M., Reinhard, M. and Buttler, A.** 2004: Forests, Tree physiology and climate. In Burley, J. editor-in-chief, *Encyclopedia of Forest Sciences.* London: Academic Press. 1644-1655.
- Schär, C. and Jendritzky, G.** 2004: Hot news from summer 2003. *Nature* 432. 559-560.
- Schweizerische Stiftung für Gesundheitsförderung und SILVIVA** (Herausgeber) 2001: *Wald und Gesundheit.* Infomappe Aktionsprogramm 2001.
- Smoyer-Tomic, K.E., Kuhn, R. and Hudson, A.** 2003: Heat Wave Hazards: An Overview of Heat Wave Impacts in Canada. *Natural Hazards* 28. 463-485.
- Sorre, M.** 1943: Le climat et l'homme. In Sorre, M. *Les fondements biologiques de la géographie humaine.* Paris : Colin, 13-113.

- Spronken-Smith, R.A.** and **Oke, T.R.** 1998: The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing* 19 (11). 2085-2104.
- Stott, P.A., Stone, D.A.** and **Allen, M.R.** 2004: Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* 432. 610-613.
- Terjung, W.H.** 1967: Annual physioclimatic stresses and regimes in the United States. *The Geographical Review* 57 (2). 227-228.
- Valleron, A.-J.** et **Boumendil, A.** 2004: Epidémiologie et canicules : analyses de la vague de chaleur 2003 en France. *C.R. Biologies* 327. 1125-1141.
- Wild-Eck, S.** 2002: *Statt Wald – Lebensqualität in der Stadt: die Bedeutung naturräumlicher Elemente am Beispiel der Stadt Zürich*. Zürich: Seismo Verlag.
- Xia, Y., Fabian, P., Stohl, A.** and **Winterhalter, M.** 1999: Forest climatology: reconstruction of mean climatological data for Bavaria, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 96. 117-129.
- Z'graggen, L.** 2006: *Die Maximaltemperaturen im Hitzesommer 2003 und Vergleich zu früheren Extremtemperaturen, Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*. Zürich: MétéoSuisse.

Annexes

1. **Grille d'analyse**
2. Pourcentage des maxima du PAR sous couvert, avril à octobre
3. Pourcentage des maxima du PAR sous couvert, juin à août
4. Pourcentage des moyennes journalières du PAR sous couvert, avril à octobre
5. Pourcentage des moyennes journalières du PAR sous couvert, juin à août
6. Moyennes des maxima et des minima de température
7. **Niveau de significativité de l'écart entre les maxima de température couvert – découvert, avril à octobre**
8. **Niveau de significativité de l'écart entre les maxima de température couvert – découvert, juin à août**
9. Niveau de significativité de **l'écart entre les minima de température couvert – découvert, avril à octobre**
10. **Niveau de significativité de l'écart entre les minima de température couvert – découvert, juin à août**
11. Emplacement des stations de mesures à Novaggio
12. Emplacement des stations de mesures à Viège
13. **Moyennes des maxima et des minima d'humidité de l'air relative**
14. **Niveau de significativité de l'écart entre les maxima d'humidité de l'air relative couvert – découvert, avril à octobre**
15. Niveau de significativité **de l'écart entre les maxima d'humidité de l'air relative couvert – découvert, juin à août**
16. **Niveau de significativité de l'écart entre les minima d'humidité de l'air relative couvert – découvert, avril à octobre**
17. **Niveau de significativité de l'écart entre les minima d'humidité de l'air relative couvert – découvert, juin à août**
18. Nombre de jours par niveau de confort selon THI, juin à août
19. Nombre de jours par niveau de confort selon THI, 1 au 14 août
20. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex, juin à août
21. Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex, 1 au 14 août

Annexe 1: Grille d'analyse

| Station | paramètre à tester | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|--------------------|----------|-------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|-----------------------|---|
| Beatenberg | | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Bettlachstock | | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Celerina | | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Chironico | | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Isonne | | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Jussy | | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Lausanne | | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Nationalpark | | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Neunkirch | | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Novaggio | | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châtaignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Othmarsingen | | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Schänis | | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Visp | | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |
| Vorderwald | | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |

Annexe 2: Pourcentage des maxima du PAR sous couvert, avril à octobre**% de PAR_{Max} mesuré à couvert en assumant que découvert = 100%, Avril à Octobre**

| Station | paramètre à tester | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|--------------------|----------|-------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|--------------------|---|
| Jussy | 13.63 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Vorderwald | 14.21 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Isonne | 14.44 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Schänis | 15.03 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Bettlachstock | 16.86 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Lausanne | 17.51 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Othmarsingen | 18.86 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Beatenberg | 19.23 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Neunkirch | 21.89 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Chironico | 28.97 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Visp | 71.64 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |
| Nationalpark | 80.09 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Celerina | 94.32 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Novaggio | 108.88 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châtaignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |

Annexe 3 : Pourcentage des maxima du PAR sous couvert, juin à août**% de PAR_{Max} mesuré à couvert en assumant que découvert = 100%, Juin à Août**

| Station | paramètre à tester | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|--------------------|----------|-------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|-----------------------|---|
| Isonne | 7.16 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Schänis | 10.91 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Jussy | 11.66 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Bettlachstock | 12.43 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Lausanne | 13.92 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Vorderwald | 15.92 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Othmarsingen | 16.92 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Beatenberg | 19.18 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Chironico | 32.05 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Neunkirch | 32.49 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Visp | 84.27 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |
| Nationalpark | 84.84 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Novaggio | 85 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châtaignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Celerina | 101.49 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |

Annexe 4 : Pourcentage des moyennes journalières du PAR sous couvert, avril à octobre**% de PAR_{Moy} mesuré à couvert en assumant que découvert = 100%, Avril à Octobre**

| Station | paramètre à tester | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|--------------------|----------|----------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|--------------------|---|
| Vordemwald | 2.76 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Lausanne | 3.83 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Jussy | 4.12 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Bettlachstock | 4.57 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Beatenberg | 5.87 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Neunkirch | 5.99 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Chironico | 6.82 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Isonne | 6.9 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Schänis | 7.32 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Othmarsingen | 7.39 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Celerina | 42.17 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Novaggio | 42.91 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châtaignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Visp | 44.39 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |
| Nationalpark | 46.26 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |

Annexe 5 : Pourcentage des moyennes journalières du PAR sous couvert, juin à août**% de PAR_{Moy} mesuré à couvert en assumant que découvert = 100%, Juin à Août**

| Station | paramètre à tester | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|--------------------|----------|-------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|--------------------|---|
| Lausanne | 1.27 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Isonne | 1.59 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Jussy | 1.81 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Bettlachstock | 2.45 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Vordemwald | 2.56 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Schânis | 2.73 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Othmarsingen | 3.5 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Neunkirch | 4.64 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Beatenberg | 5.84 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Chironico | 6.81 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Novaggio | 23.61 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châtaignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Celerina | 40.78 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Nationalpark | 47.87 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Visp | 51.1 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |

Annexe 6 : Moyennes des maxima et des minima de température

| | | MOYENNE | | | | | |
|----------------------|--------------------|---------|---------|------------|--------|---------|------------|
| | | MAXIMA | | | MINIMA | | MINIMA |
| | | 04- 10 | 06 - 08 | 1.-14.8.03 | 04- 10 | 06 - 08 | 1.-14.8.03 |
| Beatenberg | à couvert | 13.62 | 20.04 | 24.32 | 6.35 | 11.94 | 16.47 |
| | à découvert | 15.32 | 21.33 | 25.70 | 6.00 | 11.61 | 20.32 |
| | différence | -1.70 | -1.29 | -1.38 | 0.35 | 0.33 | -3.85 |
| Bettlachstock | à couvert | 16.05 | 21.62 | 26.43 | 9.72 | 14.77 | 20.13 |
| | à découvert | 19.42 | 25.61 | 30.67 | 9.84 | 14.91 | 20.32 |
| | différence | -3.37 | -4.00 | -4.24 | -0.12 | -0.14 | -0.19 |
| Celerina | à couvert | 14.04 | 20.15 | 24.12 | 2.89 | 7.59 | 10.44 |
| | à découvert | 16.61 | 22.40 | 26.90 | -0.11 | 4.11 | 5.35 |
| | différence | -2.57 | -2.26 | -2.78 | 3.00 | 3.48 | 5.09 |
| Cironico | à couvert | 13.89 | 20.38 | 24.78 | 8.04 | 13.30 | 17.48 |
| | à découvert | 16.36 | 22.85 | 27.38 | 6.57 | 11.60 | 15.49 |
| | différence | -2.47 | -2.47 | -2.60 | 1.48 | 1.70 | 1.99 |
| Isonne | à couvert | 15.01 | 20.84 | 25.49 | 9.52 | 14.82 | 19.27 |
| | à découvert | 17.58 | 24.00 | 28.75 | 9.59 | 14.99 | 19.49 |
| | différence | -2.56 | -3.16 | -3.26 | -0.08 | -0.16 | -0.22 |
| Jussy | à couvert | 20.84 | 27.43 | 33.14 | 10.58 | 15.64 | 18.38 |
| | à découvert | 22.96 | 30.13 | 35.36 | 9.36 | 14.27 | 16.56 |
| | différence | -2.12 | -2.70 | -2.22 | 1.22 | 1.37 | 1.82 |
| Laussane | à couvert | 18.57 | 23.57 | 29.20 | 10.74 | 15.24 | 19.44 |
| | à découvert | 21.03 | 26.56 | 32.02 | 11.39 | 15.96 | 19.82 |
| | différence | -2.46 | -2.99 | -2.82 | -0.65 | -0.72 | -0.38 |
| Nationalpark | à couvert | 15.26 | 21.33 | 25.52 | -0.35 | 4.07 | 6.20 |
| | à découvert | 15.04 | 20.87 | 24.84 | -0.19 | 4.29 | 6.44 |
| | différence | 0.22 | 0.46 | 0.68 | -0.16 | -0.21 | -0.24 |
| Neunkirch | à couvert | 18.95 | 25.75 | 31.46 | 10.36 | 15.98 | 19.72 |
| | à découvert | 22.55 | 29.56 | 35.93 | 8.91 | 14.28 | 16.39 |
| | différence | -3.60 | -3.81 | -4.47 | 1.45 | 1.69 | 3.33 |
| Novaggio | à couvert | 19.47 | 24.66 | 29.29 | 10.93 | 16.06 | 19.32 |
| | à découvert | 20.81 | 26.66 | 30.73 | 10.52 | 15.81 | 19.52 |
| | différence | -1.34 | -2.01 | -1.44 | 0.42 | 0.25 | -0.20 |
| Othmarsingen | à couvert | 19.53 | 26.18 | 32.03 | 9.97 | 15.59 | 17.94 |
| | à découvert | 23.46 | 30.98 | 37.50 | 9.62 | 15.22 | 17.26 |
| | différence | -3.93 | -4.80 | -5.47 | 0.35 | 0.37 | 0.68 |
| Schänis | à couvert | 17.18 | 24.50 | 28.42 | 10.35 | 17.11 | 20.44 |
| | à découvert | 20.92 | 29.21 | 33.00 | 10.07 | 16.78 | 19.69 |
| | différence | -3.75 | -4.72 | -4.58 | 0.28 | 0.33 | 0.75 |
| Viège | à couvert | 23.34 | 30.21 | 34.89 | 10.30 | 14.86 | 17.54 |
| | à découvert | 23.70 | 29.67 | 33.93 | 8.64 | 12.82 | 13.82 |
| | différence | -0.36 | 0.54 | 0.96 | 1.67 | 2.05 | 3.72 |
| Vordemwald | à couvert | 19.18 | 25.90 | 30.57 | 9.37 | 14.43 | 15.74 |
| | à découvert | 22.35 | 29.44 | 34.32 | 8.07 | 13.04 | 14.24 |
| | différence | -3.16 | -3.53 | -3.75 | 1.29 | 1.39 | 1.50 |

Annexe 7 : Niveau de significativité de l'écart entre les maxima de température couvert – découvert, avril à octobre**Niveau de significativité des différences entre T_{max} sous couvert et à découvert, Avril à Octobre**

| Station | p-Value Mann-Whitney | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|----------------------|----------|-------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|-----------------------|---|
| Bettlachstock | 8.00E-06 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Schänis | 1.20E-05 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Othmarsingen | 1.60E-05 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Vordemwald | 4.10E-05 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Neunkirch | 4.80E-05 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Isonne | 5.40E-05 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Celerina | 0.00016 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Chironico | 0.00039 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Lausanne | 0.00041 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Jussy | 0.00518 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Novaggio | 0.01692 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châteignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Beatenberg | 0.01901 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Nationalpark | 0.62154 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Visp | 0.66198 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |

Annexe 8 : Niveau de significativité de l'écart entre les maxima de température couvert – découvert, juin à août**Niveau de significativité des différences entre T_{max} sous couvert et à découvert, Juin à Août**

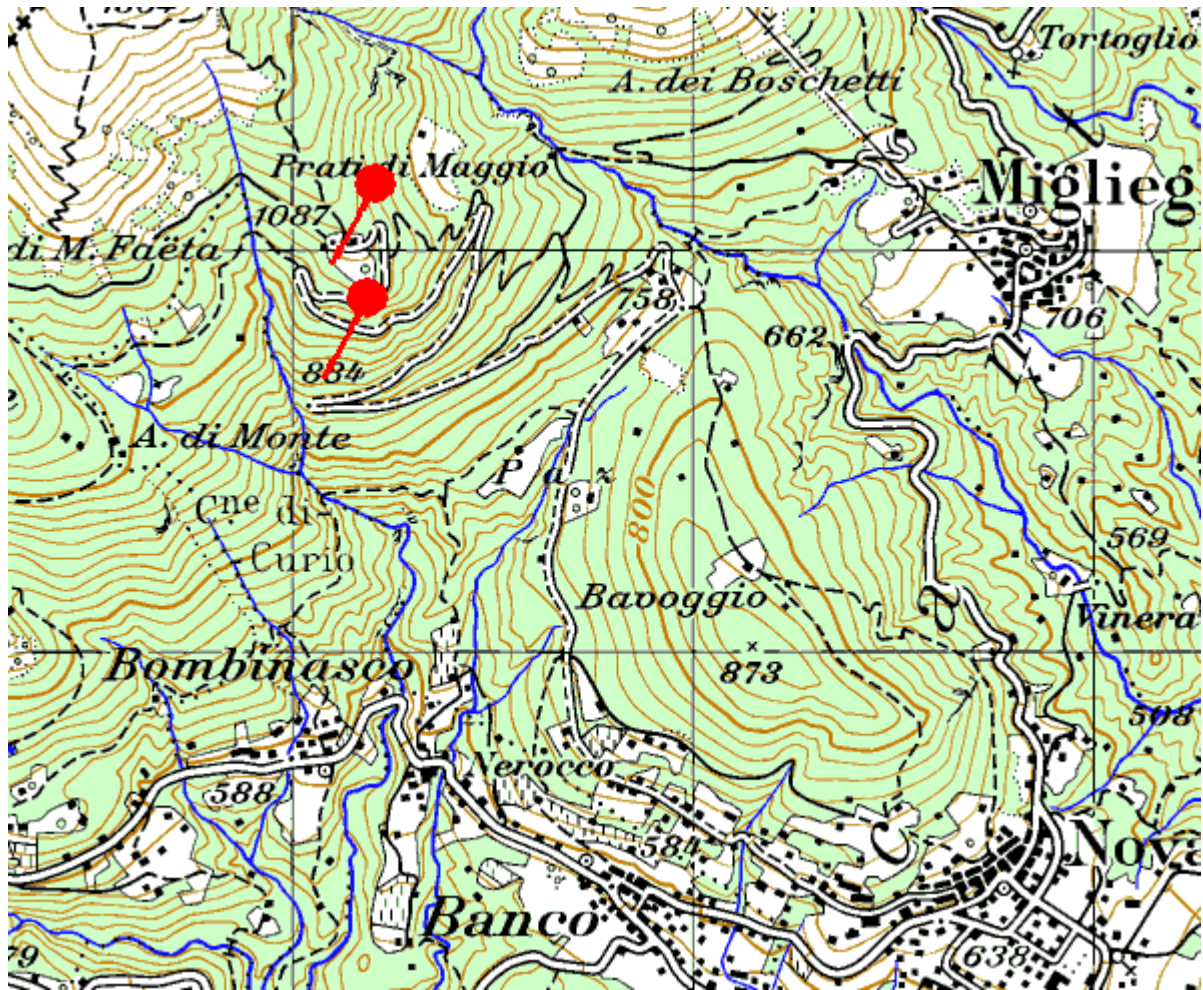
| Station | p-Value Mann-Whitney | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|----------------------|----------|-------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|-----------------------|---|
| Bettlachstock | 2.00E-06 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Celerina | 2.00E-06 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Chironico | 2.00E-06 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Isonne | 2.00E-06 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Lausanne | 2.00E-06 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Neunkirch | 2.00E-06 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Othmarsingen | 2.00E-06 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Schänis | 2.00E-06 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Vordemwald | 2.00E-06 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Novaggio | 4.00E-06 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châtaignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Jussy | 1.80E-05 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Beatenberg | 0.040822 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Nationalpark | 0.289942 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Visp | 0.352576 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |

Annexe 9 : Niveau de significativité de l'écart entre les minima de température couvert – découvert, avril à octobre**Niveau de significativité des différences entre T_{min} sous couvert et à découvert, Avril à Octobre**

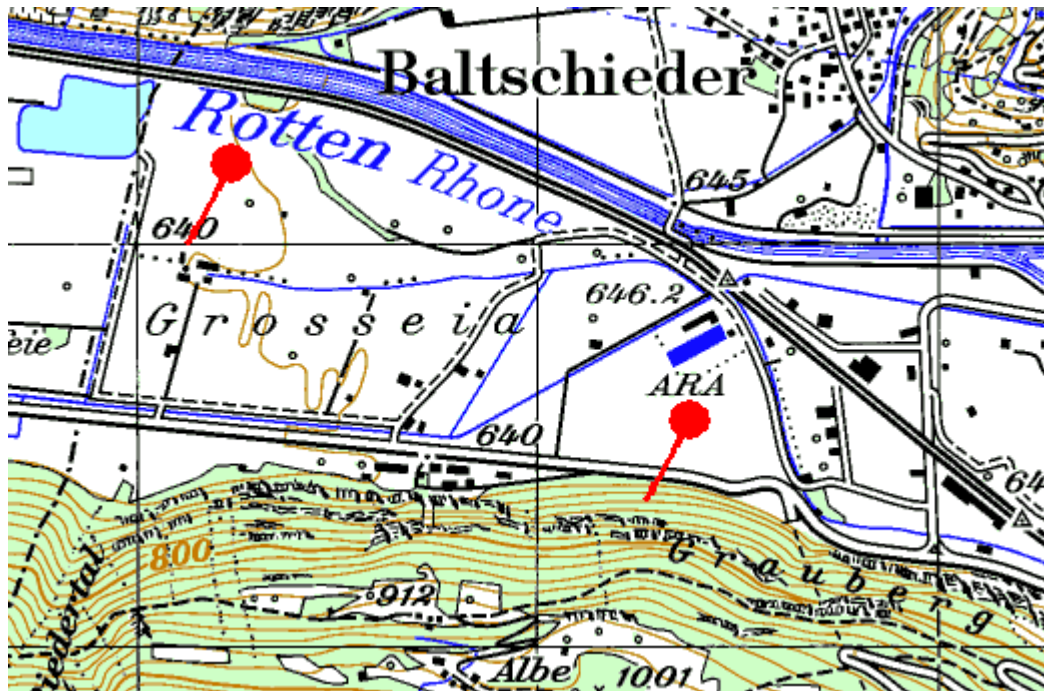
| Station | p-Value Mann-Whitney | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciophile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|----------------------|----------|-------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|--------------------|---|
| Celerina | 2.06E-06 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Visp | 0.00086797 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |
| Chironico | 0.00893876 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Vordemwald | 0.01140148 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Neunkirch | 0.027156 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciophile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Jussy | 0.0283078 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Lausanne | 0.212388 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciophile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Novaggio | 0.491266 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châtaignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Othmarsingen | 0.57975 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciophile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Beatenberg | 0.601622 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Schänis | 0.64481 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciophile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Nationalpark | 0.647268 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Bettlachstock | 0.80374 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciophile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Isonne | 0.867678 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciophile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |

Annexe 10 : Niveau de significativité de l'écart entre les minima de température couvert – découvert, juin à août**Niveau de significativité des différences entre T_{min} sous couvert et à découvert, Juin à Août**

| Station | p-Value Mann-Whitney | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|----------------------|----------|-------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|--------------------|---|
| Celerina | 2.00E-06 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Visp | 2.00E-06 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |
| Vordemwald | 2.00E-06 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Chironico | 2.00E-05 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Jussy | 0.000122 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Neunkirch | 0.000268 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Lausanne | 0.080188 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Othmarsingen | 0.34642 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Schânis | 0.462558 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Nationalpark | 0.485094 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Novaggio | 0.50193 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châtaignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Beatenberg | 0.686382 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Isonne | 0.723638 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Bettlachstock | 0.74914 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |

Annexe 11 : Emplacement des stations de mesures à Novaggio

Source: Bundesamt für Landestopographie, Die Landeskarten der Schweiz, Swiss Map 50

Annexe 12: Emplacement des stations de mesures à Viège

Source: Bundesamt für Landestopographie, Die Landeskarten der Schweiz, Swiss Map 50

Annexe 13 : Moyennes des maxima et des minima d'humidité de l'air relative

| | | MOYENNE | | | |
|----------------------|--------------------|---------|---------|--------|---------|
| | | MAXIMA | | MINIMA | |
| | | 04- 10 | 06 - 08 | 04- 10 | 06 - 08 |
| Beatenberg | à couvert | 80.75 | 75.55 | 55.74 | 50.55 |
| | à découvert | 85.19 | 80.92 | 54.04 | 49.89 |
| | différence | -4.44 | -5.36 | 1.69 | 0.66 |
| Bettlachstock | à couvert | 81.24 | 75.43 | 55.95 | 48.64 |
| | à découvert | 80.59 | 74.15 | 50.95 | 43.26 |
| | différence | 0.65 | 1.29 | 5.00 | 5.38 |
| Celerina | à couvert | 81.79 | 80.58 | 42.82 | 38.64 |
| | à découvert | 91.40 | 91.93 | 39.03 | 35.65 |
| | différence | -9.61 | -11.35 | 3.79 | 2.99 |
| Cironico | à couvert | 74.39 | 70.52 | 51.33 | 45.21 |
| | à découvert | 79.20 | 76.37 | 48.62 | 43.64 |
| | différence | -4.81 | -5.85 | 2.71 | 1.57 |
| Isonne | à couvert | 75.24 | 73.15 | 51.79 | 49.92 |
| | à découvert | 74.40 | 72.07 | 47.72 | 45.25 |
| | différence | 0.84 | 1.08 | 4.08 | 4.67 |
| Jussy | à couvert | 80.55 | 76.38 | 47.79 | 38.32 |
| | à découvert | 84.41 | 79.58 | 41.64 | 31.76 |
| | différence | -3.86 | -3.20 | 6.15 | 6.56 |
| Laussane | à couvert | 87.71 | 82.31 | 55.77 | 47.63 |
| | à découvert | 87.64 | 81.22 | 48.53 | 39.11 |
| | différence | 0.07 | 1.09 | 7.25 | 8.51 |
| Nationalpark | à couvert | 87.44 | 87.50 | 38.37 | 33.97 |
| | à découvert | 87.77 | 87.70 | 38.19 | 34.25 |
| | différence | -0.34 | -0.20 | 0.18 | -0.28 |
| Neunkirch | à couvert | 79.58 | 75.33 | 47.96 | 40.33 |
| | à découvert | 83.21 | 80.38 | 42.27 | 34.50 |
| | différence | -3.62 | -5.05 | 5.69 | 5.82 |
| Novaggio | à couvert | 76.21 | 74.77 | 48.69 | 49.23 |
| | à découvert | 76.25 | 72.57 | 47.19 | 46.23 |
| | différence | -0.04 | 2.20 | 1.50 | 3.01 |
| Othmarsingen | à couvert | 81.90 | 78.04 | 47.76 | 39.35 |
| | à découvert | 86.51 | 82.96 | 44.53 | 36.85 |
| | différence | -4.61 | -4.92 | 3.23 | 2.51 |
| Schänis | à couvert | 80.17 | 73.74 | 54.23 | 46.92 |
| | à découvert | 80.21 | 72.59 | 49.20 | 42.55 |
| | différence | -0.04 | 1.15 | 5.03 | 4.37 |
| Viège | à couvert | 72.52 | 70.86 | 32.49 | 29.49 |
| | à découvert | 86.27 | 85.48 | 32.56 | 29.99 |
| | différence | -13.75 | -14.62 | -0.07 | -0.50 |
| Vordemwald | à couvert | 91.98 | 87.92 | 52.36 | 41.98 |
| | à découvert | 88.22 | 85.58 | 43.59 | 35.42 |
| | différence | 3.76 | 2.33 | 8.77 | 6.56 |

Annexe 14 : Niveau de significativité de l'écart entre les maxima d'humidité de l'air relative couvert – découvert, avril à octobre**Niveau de significativité des différences entre H_{max} sous couvert et à découvert, Avril à Octobre**

| Station | p-Value Mann-Whitney | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|----------------------|----------|-------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|--------------------|---|
| Othmarsingen | 2.00E-06 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Vordemwald | 2.00E-06 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Celerina | 2.05E-06 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Visp | 2.06E-06 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |
| Jussy | 2.07E-06 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Beatenberg | 4.00E-06 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Chironico | 3.10E-05 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Nationalpark | 0.0287326 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Neunkirch | 0.038254 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Lausanne | 0.150772 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Novaggio | 0.30874 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châtaignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Isonne | 0.428938 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Bettlachstock | 0.901132 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Schänis | 0.917652 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |

Annexe 15 : Niveau de significativité de l'écart entre les maxima d'humidité de l'air relative couvert – découvert, juin à août**Niveau de significativité des différences entre H_{max} sous couvert et à découvert, Juin à Août**

| Station | p-Value Mann-Whitney | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|----------------------|----------|-------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|--------------------|---|
| Celerina | 2.00E-06 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Visp | 2.00E-06 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |
| Othmarsingen | 1.42E-04 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Chironico | 0.001782 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Jussy | 0.004462 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Beatenberg | 0.012058 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Vorderwald | 0.027946 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Neunkirch | 0.03099 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Novaggio | 0.363520 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châteignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Isonne | 0.453424 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Nationalpark | 0.457188 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Bettlachstock | 0.553578 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Schänis | 0.674352 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Lausanne | 0.77719 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |

Annexe 16 : Niveau de significativité de l'écart entre les minima d'humidité de l'air relative couvert – découvert, avril à octobre**Niveau de significativité des différences entre H_{min} sous couvert et à découvert, Avril à Octobre**

| Station | p-Value Mann-Whitney | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|----------------------|----------|-------------|-------------|-------------|--|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|--------------------|---|
| Vordemwald | 1.40E-05 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Jussy | 6.41E-05 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Lausanne | 0.000272 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Neunkirch | 0.000626 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Schänis | 0.001464 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Celerina | 0.0020126 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Bettlachstock | 0.002566 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Isonne | 0.00559 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Othmarsingen | 0.026168 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Chironico | 0.0607464 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Novaggio | 0.1848372 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châtaignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Beatenberg | 0.213044 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |
| Nationalpark | 0.807672 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Visp | 0.843424 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |

Annexe 17 : Niveau de significativité de l'écart entre les minima d'humidité de l'air relative couvert – découvert, juin à août**Niveau de significativité des différences entre H_{min} sous couvert et à découvert, Juin à Août**

| Station | p-Value Mann-Whitney | Région | Altitude | Orientation | Inclinaison | Espèce dominante | age | Sciaphile ou héliophile | Conifère ou feuillus | Densité de la forêt (arbre >=12 cm/ha) | Sol | Particularité dans l'emplacement |
|---------------|----------------------|----------|-------------|-------------|-------------|---|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|--|--------------------|---|
| Lausanne | 0.000264 | Plateau | 800 - 814 | NE | 7% | Hêtre Sapin Epicéa | 150 - 160 150 - 160 150 - 160 | Sciaphile | Feuillus mixte | 320 | Dystric Cambisol | |
| Jussy | 0.000412 | Plateau | 496 - 506 | plaine | 3% | Chêne Charme Peuplier | 50 50 50 | Héliophile | Feuillus | 622 | Eutric Gleysol | Découvert: dans une clairière |
| Vordemwald | 0.001768 | Plateau | 473 - 487 | NW | 14% | Sapin Chêne | 100 180 - 200 | | Conifère mixte | 536 | Dystric Planosol | |
| Neunkirch | 0.00275 | Jura | 554 - 609 | N | 58% | Hêtre Erable Tilleul | 150 150 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 222 | Rendzic Leptosol | Différence d'inclinaison |
| Bettlachstock | 0.004866 | Jura | 1101 - 1196 | S | 66% | Hêtre Epicéa Frêne Orme Sapin | 170 200 160 150 180 | Sciaphile | Feuillus mixte | 464 | Rendzic Leptosol | Découvert: dans une clairière |
| Schänis | 0.013254 | Préalpes | 693 - 773 | W | 60% | Hêtre Sapin Frêne | 120 - 140 120 - 140 120 - 140 | Sciaphile | Feuillus mixte | 300 | Eutric Cambisol | |
| Isonne | 0.019182 | Tessin | 1181 - 1259 | NE | 58% | Hêtre | 60 - 75 - 90 | Sciaphile | Feuillus | 603 | Podsol | Découvert: dans une clairière |
| Celerina | 0.042 | Grisons | 1846 - 1896 | NE | 34% | Arole | 200 - 240 | Héliophile | Conifère | 234 | Podsol | Découvert: dans une percée |
| Novaggio | 0.063294 | Tessin | 902 - 997 | S | 68% | Chêne Châteignier Bouleau | 60 80 60 | Héliophile | Feuillus | 658 | Podsol | Découvert dans une clairière près de la lisière |
| Othmarsingen | 0.113646 | Plateau | 467 - 500 | S | 27% | Hêtre Tilleul | 110 - 130 110 - 130 | Sciaphile | Feuillus | 154 | Haplic Acrisol | Découvert: dans une clairière |
| Chironico | 0.298986 | Tessin | 1352 - 1387 | N | 35% | Epicéa Sapin | 150 - 170 130 - 150 | | Conifère | 376 | Podsol | Différence d'inclinaison |
| Nationalpark | 0.586502 | Grisons | 1890 - 1907 | S | 11% | Pin montagnard | 200 | Héliophile | Conifère | 1228 | Calcaric Fluvisol | Découvert: dans une grande clairière |
| Visp | 0.62221 | Valais | 657 - 733 | N | 80% | Pin sylvestre | 30 - 70 | Héliophile | Conifère | 275 | Calcaric Phaeozeme | Différence d'inclinaison & ev. sol |
| Beatenberg | 0.73557 | Préalpes | 1490 - 1170 | SW | 33% | Epicéa | 180 - 220 | | Conifère | 412 | Podsol | |

Annexe 18 : Nombre de jours par niveau de confort selon THI, juin à août 2003

| | | Juin - Août | | | | |
|---------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Station | | # de jours froids | # de jours frais | # de jours confortables | # de jours chauds | # de jours très chauds |
| Beatenberg | à couvert | 4 | 6 | 45 | 22 | 0 |
| | à découvert | 3 | 6 | 32 | 36 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>1</i> | <i>0</i> | <i>13</i> | <i>-14</i> | <i>0</i> |
| Bettlachstock | à couvert | 2 | 3 | 44 | 41 | 0 |
| | à découvert | 0 | 2 | 12 | 76 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>2</i> | <i>1</i> | <i>32</i> | <i>-35</i> | <i>0</i> |
| Celerina | à couvert | 5 | 2 | 68 | 17 | 0 |
| | à découvert | 1 | 4 | 47 | 40 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>4</i> | <i>-2</i> | <i>21</i> | <i>-23</i> | <i>0</i> |
| Chironico | à couvert | 0 | 4 | 67 | 21 | 0 |
| | à découvert | 0 | 3 | 37 | 52 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>1</i> | <i>30</i> | <i>-31</i> | <i>0</i> |
| Isonne | à couvert | 0 | 0 | 49 | 31 | 0 |
| | à découvert | 0 | 0 | 18 | 62 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>31</i> | <i>-31</i> | <i>0</i> |
| Jussy | à couvert | 0 | 0 | 9 | 83 | 0 |
| | à découvert | 0 | 0 | 4 | 77 | 11 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>-11</i> |
| Lausanne | à couvert | 1 | 2 | 23 | 65 | 0 |
| | à découvert | 0 | 0 | 10 | 81 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>13</i> | <i>-16</i> | <i>0</i> |
| Nationalpark | à couvert | 3 | 4 | 57 | 28 | 0 |
| | à découvert | 1 | 7 | 62 | 22 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>2</i> | <i>-3</i> | <i>-5</i> | <i>6</i> | <i>0</i> |
| Neunkirch | à couvert | 0 | 1 | 14 | 62 | 0 |
| | à découvert | 0 | 0 | 7 | 57 | 13 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>1</i> | <i>7</i> | <i>5</i> | <i>-13</i> |
| Novaggio | à couvert | 0 | 0 | 17 | 74 | 0 |
| | à découvert | 0 | 0 | 5 | 86 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>12</i> | <i>-12</i> | <i>0</i> |
| Othmarsingen | à couvert | 0 | 0 | 14 | 50 | 0 |
| | à découvert | 0 | 0 | 5 | 40 | 19 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>9</i> | <i>10</i> | <i>-19</i> |
| Schänis | à couvert | 0 | 0 | 10 | 52 | 0 |
| | à découvert | 0 | 1 | 3 | 46 | 12 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>-1</i> | <i>7</i> | <i>6</i> | <i>-12</i> |
| Visp | à couvert | 0 | 0 | 5 | 80 | 6 |
| | à découvert | 0 | 0 | 5 | 84 | 2 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>-4</i> | <i>4</i> |
| Vordemwald | à couvert | 0 | 1 | 14 | 76 | 0 |
| | à découvert | 0 | 0 | 8 | 75 | 8 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>1</i> | <i>6</i> | <i>1</i> | <i>-8</i> |
| Total | à couvert | 15 | 23 | 436 | 702 | 6 |
| | à découvert | 5 | 23 | 255 | 834 | 65 |

Annexe 19 : Nombre de jours par niveau de confort selon THI, 1 au 14 août 2003

| | | 1 - 14 Août | | |
|---------------|-------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|
| Station | | # de jours confortables | # de jours chauds | # de jours très chauds |
| Beatenberg | à couvert | 3 | 10 | 0 |
| | à découvert | 1 | 12 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>2</i> | <i>-2</i> | <i>0</i> |
| Bettlachstock | à couvert | 1 | 13 | 0 |
| | à découvert | 0 | 14 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>1</i> | <i>-1</i> | <i>0</i> |
| Celerina | à couvert | 3 | 11 | 0 |
| | à découvert | 0 | 14 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>3</i> | <i>-3</i> | <i>0</i> |
| Chironico | à couvert | 3 | 11 | 0 |
| | à découvert | 0 | 14 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>3</i> | <i>-3</i> | <i>0</i> |
| Isonne | à couvert | 0 | 6 | 0 |
| | à découvert | 0 | 6 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> |
| Jussy | à couvert | 0 | 14 | 0 |
| | à découvert | 0 | 7 | 7 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>7</i> | <i>-7</i> |
| Lausanne | à couvert | 0 | 14 | 0 |
| | à découvert | 0 | 14 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> |
| Nationalpark | à couvert | 2 | 12 | 0 |
| | à découvert | 2 | 12 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> |
| Neunkirch | à couvert | 0 | 14 | 0 |
| | à découvert | 0 | 3 | 11 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>11</i> | <i>-11</i> |
| Novaggio | à couvert | 0 | 13 | 0 |
| | à découvert | 0 | 13 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> |
| Othmarsingen | à couvert | 0 | 13 | 0 |
| | à découvert | 0 | 2 | 11 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>11</i> | <i>-11</i> |
| Schänis | à couvert | 0 | 14 | 0 |
| | à découvert | 0 | 4 | 10 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>10</i> | <i>-10</i> |
| Visp | à couvert | 0 | 9 | 5 |
| | à découvert | 0 | 12 | 2 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>-3</i> | <i>3</i> |
| Vordemwald | à couvert | 0 | 13 | 0 |
| | à découvert | 0 | 7 | 6 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>6</i> | <i>-6</i> |
| Total | à couvert | 12 | 167 | 5 |
| | à découvert | 3 | 134 | 47 |

Annexe 20 : Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex, avril à octobre 2003

| Station | | Juni - Août | | |
|---------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| | | # de jours "aucun inconfort" | # de jours "certain inconfort" | # de jours "beaucoup d'inconfort" |
| Beatenberg | à couvert | 77 | 0 | 0 |
| | à découvert | 74 | 3 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>3</i> | <i>-3</i> | <i>0</i> |
| Bettlachstock | à couvert | 86 | 4 | 0 |
| | à découvert | 60 | 30 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>26</i> | <i>-26</i> | <i>0</i> |
| Celerina | à couvert | 92 | 0 | 0 |
| | à découvert | 92 | 0 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> |
| Chironico | à couvert | 92 | 0 | 0 |
| | à découvert | 89 | 3 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>3</i> | <i>-3</i> | <i>0</i> |
| Isonne | à couvert | 80 | 0 | 0 |
| | à découvert | 68 | 12 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>12</i> | <i>-12</i> | <i>0</i> |
| Jussy | à couvert | 48 | 44 | 0 |
| | à découvert | 25 | 67 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>23</i> | <i>-23</i> | <i>0</i> |
| Lausanne | à couvert | 75 | 16 | 0 |
| | à découvert | 57 | 34 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>18</i> | <i>-18</i> | <i>0</i> |
| Nationalpark | à couvert | 92 | 0 | 0 |
| | à découvert | 92 | 0 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> |
| Neunkirch | à couvert | 51 | 26 | 0 |
| | à découvert | 22 | 52 | 3 |
| | <i>différence</i> | <i>29</i> | <i>-26</i> | <i>-3</i> |
| Novaggio | à couvert | 65 | 26 | 0 |
| | à découvert | 28 | 63 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>37</i> | <i>-37</i> | <i>0</i> |
| Othmarsingen | à couvert | 43 | 21 | 0 |
| | à découvert | 12 | 40 | 12 |
| | <i>différence</i> | <i>31</i> | <i>-19</i> | <i>-12</i> |
| Schänis | à couvert | 45 | 17 | 0 |
| | à découvert | 11 | 48 | 3 |
| | <i>différence</i> | <i>34</i> | <i>-31</i> | <i>-3</i> |
| Visp | à couvert | 25 | 65 | 1 |
| | à découvert | 30 | 60 | 1 |
| | <i>différence</i> | <i>-5</i> | <i>5</i> | <i>0</i> |
| Vordemwald | à couvert | 59 | 32 | 0 |
| | à découvert | 22 | 69 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>37</i> | <i>-37</i> | <i>0</i> |
| Total | à couvert | 930 | 251 | 1 |
| | à découvert | 682 | 481 | 19 |

Annexe 21 : Nombre de jours par niveau de confort selon Humidex, 1 au 14 août 2003

| | | 1 - 14 Août | | |
|---------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Station | | # de jours "aucun inconfort" | # de jours "certain inconfort" | # de jours "beaucoup d'inconfort" |
| Beatenberg | à couvert | 13 | 0 | 0 |
| | à découvert | 10 | 3 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>3</i> | <i>-3</i> | <i>0</i> |
| Bettlachstock | à couvert | 10 | 4 | 0 |
| | à découvert | 2 | 12 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>8</i> | <i>-8</i> | <i>0</i> |
| Celerina | à couvert | 14 | 0 | 0 |
| | à découvert | 14 | 0 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> |
| Chironico | à couvert | 14 | 0 | 0 |
| | à découvert | 2 | 12 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>12</i> | <i>-12</i> | <i>0</i> |
| Isonne | à couvert | 6 | 0 | 0 |
| | à découvert | 2 | 4 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>4</i> | <i>-4</i> | <i>0</i> |
| Jussy | à couvert | 1 | 13 | 0 |
| | à découvert | 0 | 14 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>1</i> | <i>-1</i> | <i>0</i> |
| Lausanne | à couvert | 4 | 10 | 0 |
| | à découvert | 2 | 12 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>2</i> | <i>-2</i> | <i>0</i> |
| Nationalpark | à couvert | 14 | 0 | 0 |
| | à découvert | 14 | 0 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> |
| Neunkirch | à couvert | 2 | 12 | 0 |
| | à découvert | 0 | 12 | 2 |
| | <i>différence</i> | <i>2</i> | <i>0</i> | <i>-2</i> |
| Novaggio | à couvert | 2 | 11 | 0 |
| | à découvert | 0 | 13 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>2</i> | <i>-2</i> | <i>0</i> |
| Othmarsingen | à couvert | 2 | 11 | 0 |
| | à découvert | 0 | 4 | 9 |
| | <i>différence</i> | <i>2</i> | <i>7</i> | <i>-9</i> |
| Schänis | à couvert | 2 | 12 | 0 |
| | à découvert | 0 | 12 | 2 |
| | <i>différence</i> | <i>2</i> | <i>0</i> | <i>-2</i> |
| Visp | à couvert | 0 | 13 | 1 |
| | à découvert | 0 | 13 | 1 |
| | <i>différence</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> |
| Vordemwald | à couvert | 2 | 11 | 0 |
| | à découvert | 1 | 12 | 0 |
| | <i>différence</i> | <i>1</i> | <i>-1</i> | <i>0</i> |
| Total | à couvert | 86 | 97 | 1 |
| | à découvert | 47 | 123 | 14 |