

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 151 (2000)

Heft: 10

Artikel: Essai d'application de modèles météorologiques au calcul du moment d'apparition de deux phases phénologiques

Autor: Primault, Bernard

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098379>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Essai d'application de modèles météorologiques au calcul du moment d'apparition de deux phases phénologiques

BERNARD PRIMAULT

Keywords: Meteorology; phenological phases; statistics; Switzerland. FDK 111 : 181.8 : UDK 519.22 : (494)

1. Introduction

En observant, année après année, l'évolution de la végétation au printemps, chacun peut se rendre compte que la nature ne suit pas du tout les exigences de notre calendrier civil. En effet, chaque année voit les forêts reverdir à une autre date. L'ordre selon lequel les feuilles de diverses essences apparaissent est même souvent inversé au printemps (voir à ce propos PETER-COMTESSE, 1957).

De nombreux auteurs ont, bien avant nous, démontré que la température jouait ici un rôle éminent, si ce n'est prépondérant. A ce propos citons simplement GESLIN (1944), GENSLER (1946), JACQUIOT (1950), ainsi que PETER-COMTESSE (1957 et 1964).

Afin d'approcher le mieux possible cette relation, nous avons proposé un modèle qui ne se base que sur l'évolution de la température pour calculer le «début de la période de végétation». Ce modèle a été utilisé plusieurs fois déjà dans diverses études (PRIMAULT, 1953 et 1972a; PRIMAULT et FANKHAUSER 1988).

Lors de son élaboration, le dit modèle ne devait servir qu'à initier, au printemps, la période durant laquelle les arbres, l'épicéa en l'occurrence, déposaient de la cellulose dans le tronc (largeur des cernes annuelles). On ne possédait alors pas de données phénologiques permettant un contrôle, voire une simple comparaison. Ce modèle est donc resté longtemps purement théorique.

Ce n'est que vers 1990 que nous avons recherché des liaisons entre des observations phénologiques et le dit modèle (PRIMAULT, 1990 et 1992). En outre et en raison des nombreux dictons populaires se rapportant à l'influence de diverses phases et positions de la lune sur le développement des végétaux, nous avons recherché si ces phénomènes célestes, voire d'autres, avaient une répercussion sur le déclenchement des phénomènes vitaux de nos arbres. En vain malheureusement (PRIMAULT, 1991).

2. Premières constatations

A la réflexion et en tenant compte des relevés des diverses stations d'observations du réseau phénologique suisse (DEFILA, 1991; VASELLA et BRÜGGER, 1997), il nous a paru qu'un modèle unique ne pouvait guère se justifier, même si il ne devait s'appliquer qu'à une seule essence végétale. Il fallait donc en différencier les données par exemple selon l'altitude du lieu, voire la situation orographique (exposition, pente du terrain, situations particulières telles que crête, pente, fond de vallée, etc.).

Pour nous en assurer, nous avons, dans un premier temps, confronté les dates obtenues en partant du modèle primitif (sept jours consécutifs à 5°C ou davantage de température moyenne journalière) et celles observées sur le terrain aux trois stations faisant l'objet des recherches effectuées lors du PNR14+ (cf. PRIMAULT et FANKHAUSER, 1988). Nous avons dû constater que si, en plaine, l'apparition d'une phase phénologique (le débourrement) de deux essences forestières (épicéa et mélèze) était toujours située après le délai calculé, il en allait autrement en montagne (figure 1).

A Davos, il arrive que le débourrement soit observé avant la date résultant du calcul basé sur notre modèle primitif. Cette constatation est valable principalement pour le mélèze (cf. figure 1 à droite).

Ainsi, le «début de la période de végétation» selon la définition donnée plus haut ne correspond pas avec l'apparition d'une phase végétative déterminée, serait-ce le premier signe visible du «renouveau» (dans notre cas: le débourrement). Les plantes et les arbres en particulier, présentent des signes cachés de «réveil» bien avant que des phénomènes visibles n'apparaissent. Ainsi, le mouvement de l'eau dans le cambium (montée de sève), voire le développement de ce dernier, débute dès que la température de l'écorce atteint une certaine valeur (cf. PRIMAULT, 1954). Il résulte donc un certain décalage temporel entre le moment où la plante commence à réagir à l'élévation de la température (dans le sol et/ou dans l'air) et celui où des signes directement et facilement observables se manifestent.

Cette constatation montre, à elle seule déjà, la nécessité de recherches complémentaires pouvant déboucher sur un modèle tout différent ou, pour le moins, sur une adaptation du modèle utilisé jusqu'ici dans nos travaux.

En outre, un seul modèle ne peut, vraisemblablement, guère être valable de façon universelle, c'est-à-dire s'appliquer en tous lieux et à toutes les variétés d'arbres.

3. Manières possibles de procéder en partant du modèle primitif

3.1 Faire varier la période de carence

Les conclusions de certains chercheurs, en particulier de ENGLER (1905) et de BURGER (1935) montrent qu'une même variété d'arbres ne réagit pas partout de façon identique. Il semble donc que la nature soumette les espèces végétales à une sélection très sévère selon les impacts qu'elles subissent de leur milieu ambiant, en particulier une hausse de la température au printemps. Ainsi, selon les deux auteurs cités, les arbres forestiers réagissent très rapidement à une hausse de la température si leurs ancêtres ont vécu en montagne, beaucoup plus lentement si ceux-ci proviennent de la plaine. De ce fait, des mélèzes venant de l'Engadine (GR) ou des épicéas provenant du Stanserhorn (NW) gèlent régulièrement à Zurich alors que des descendants d'arbres des mêmes espèces provenant de la région de Zurich, transplantés dans les deux sites cités plus haut, n'y gèlent pratiquement jamais.

Partant de ces constatations, notre première idée fut de faire varier la durée théorique de réaction des plantes en réduisant progressivement la période de carence de quatorze à un jour tout en maintenant le seuil thermique de base à 5°C.

Pour condenser les résultats obtenus et leur donner une signification statistique, nous avons calculé à chaque fois le coefficient de corrélation entre la date calculée (variable indépendante) et la date observée (variable dépendante). Ces chiffres ont été reportés sous forme graphique à la figure 2 sur laquelle nous avons fait figurer en outre les significations contre zéro (1 = à 0,1; 2 = à 0,05; 3 = à 0,01 et 4 = à 0,001).

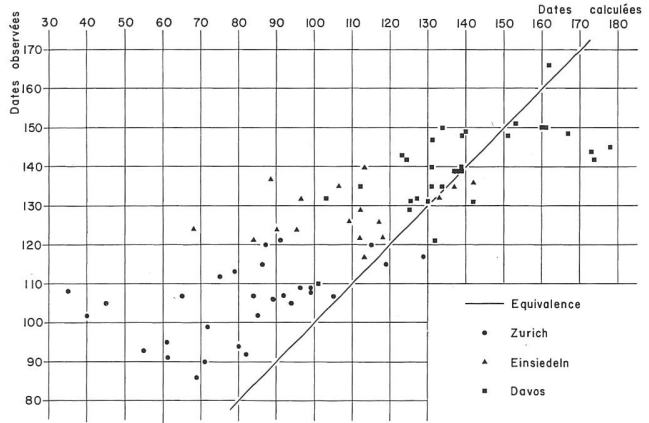
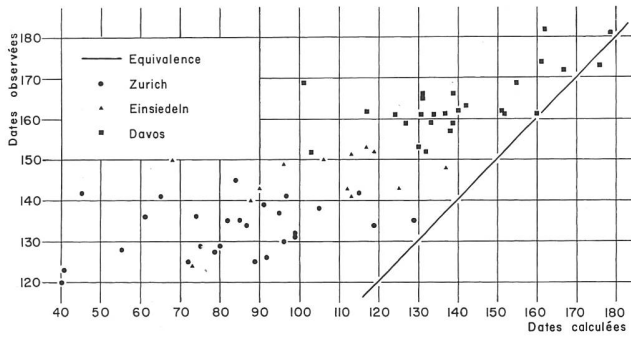


Figure 1: Dates observées du débourrement et dates calculées selon le modèle primitif. Épicéa à gauche, Mélèze à droite.

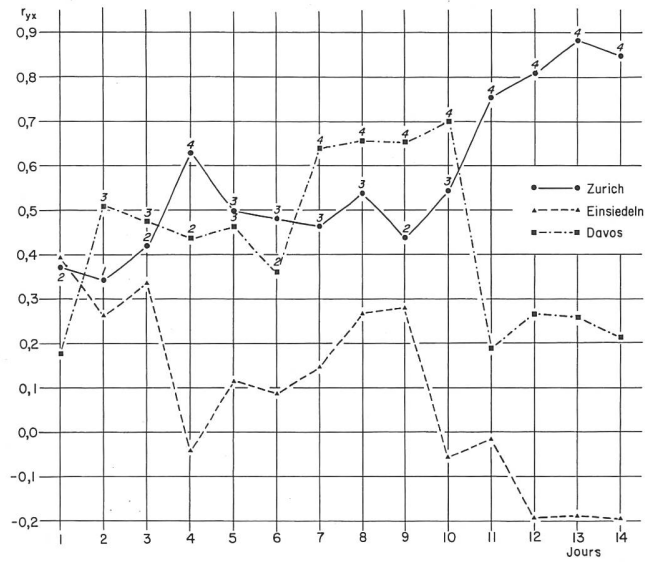
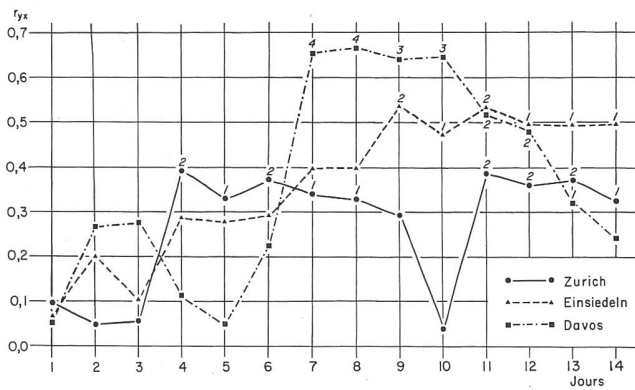


Figure 2: Variation du coefficient de corrélation en fonction du nombre de jours de la période de carence (température de base 5 °C). A gauche pour l'épicéa, à droite pour le mélèze.

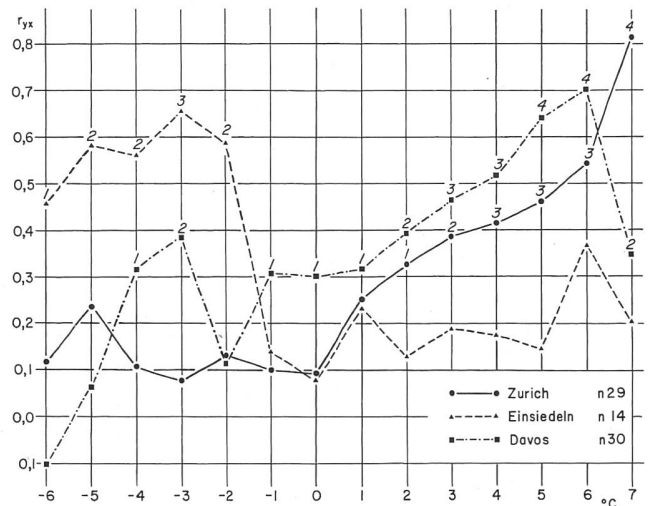
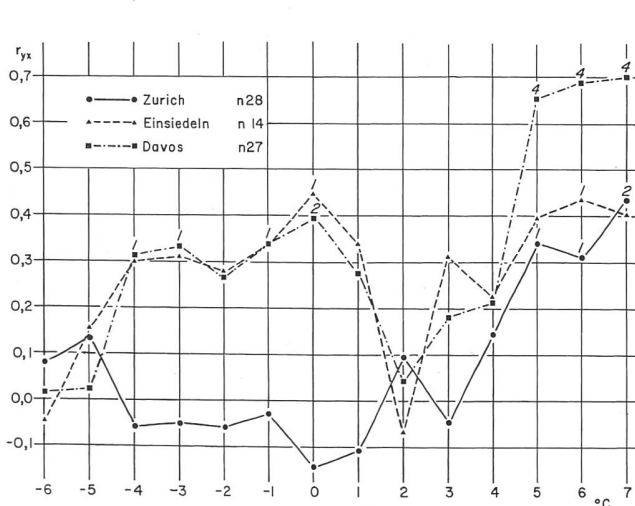


Figure 4: Coefficients de corrélation en fonction de la température de base. Période de carence de 7 jours. A gauche pour l'épicéa, à droite pour le mélèze.

Pour l'épicéa, cette figure nous montre que la corrélation n'est significative à 0,001 ou moins que à Davos avec un maximum, peu marqué il est vrai, à 8 jours de carence.

Pour le mélèze, on trouve une excellente corrélation tant à Zurich qu'à Davos, mais pas du tout à Einsiedeln. Mis à part la pointe isolée de Zurich à 4 jours, ces courbes semblent conforter les conclusions de ENGLER (1905), c'est-à-dire que les mélèzes de montagne réagissent plus vite à une hausse de température que ceux de la plaine. En effet la meilleure corrélation se trouve à 10 jours à Davos, mais à 13 jours à Zurich.

3.2 Faire varier le seuil thermique de base

Au cours des essais effectués dans le cadre du PNR14+, on a mesuré simultanément dans des chambres étanches la température des aiguilles d'épicéa et la teneur en gaz carbonique de l'air confiné. Il était ainsi possible de déterminer à quelle température la fonction chlorophyllienne débutait (inversion de la teneur en gaz carbonique de l'air confiné ambiant). A la figure 3, nous donnons le résultat de ces mesures durant une année à Davos (ITEM, 1990).

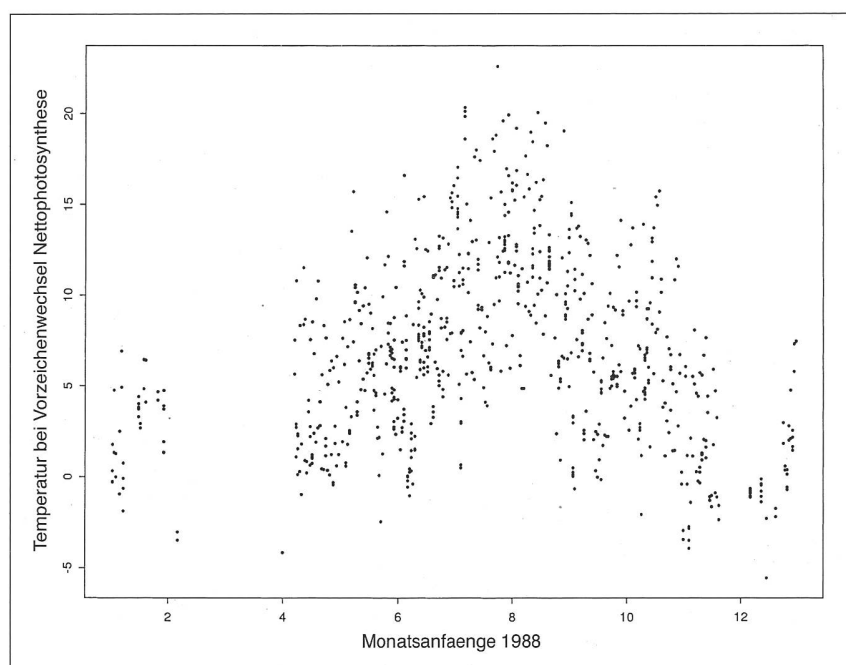


Figure 3: Température à laquelle l'épicéa commence à assimiler en fonction de la date, selon ITEM.

On peut déduire de cette figure que, selon la saison, la température permettant l'assimilation, donc l'activité des aiguilles, varie énormément. Pourtant, cette variabilité n'est qu'apparente. A part un seuil inférieur situé vers -4°C , elle dépend du minimum de la nuit qui, lui, évolue au cours des saisons.

Pourtant, la conclusion principale que nous pouvons tirer de cette figure est que le seuil de $+5^{\circ}\text{C}$ déterminé par JACQUIOT (1950) pour l'activité du cambium du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) dans la région de Nancy n'est certainement pas valable pour celle des aiguilles d'épicéa et, par analogie, pas non plus pour celles du mélèze.

Nonobstant ce qui précède, et partant de notre modèle primitif, nous avons fait varier la température de base de -6°C à $+7^{\circ}\text{C}$, soient 2° de moins que le seuil donné par ITEM (1990) et 2° de plus que la valeur admise précédemment. Nous avons cependant maintenu ici la période de carence à 7 jours consécutifs. Comme base de comparaison, nous avons ici aussi procédé au calcul des coefficients de corrélation comme plus haut. Les résultats obtenus sont consignés à la figure 4.

Pour l'épicéa, les courbes d'Einsiedeln et de Davos présentent de grandes similitudes, alors que celle de Zurich s'écarte notablement des deux premières.

Dans les premières, on rencontre des maxima à -3°C , à 0°C , mais aussi à $+6^{\circ}\text{C}$, resp. $+7^{\circ}\text{C}$, température où culmine également la courbe de Zurich. Le premier maximum cité, le moins prononcé il est vrai, se rapproche fort des relevés de Item, alors que les autres s'en éloignent fortement.

Dans le cas du mélèze, le tracé des courbes est bien différent. Si les courbes d'Einsiedeln et de Davos sont semblables entre -6°C et -2°C et présentent toutes deux un maximum à $+6^{\circ}\text{C}$, celles de Zurich et de Davos sont quasi parallèles entre -1°C et $+6^{\circ}\text{C}$.

3.3 Première conclusion intermédiaire

Par ces calculs, on pressent la complexité des réactions végétales aux impacts du milieu ambiant, en particulier des températures.

Ainsi, faire varier un seul des paramètres du modèle primitif ne conduit pas à une solution du problème posé. En outre, d'autres démarches sont envisageables pour mieux cerner les réactions physiologiques des plantes, des arbres en particulier.

4. Températures cumulées

Dans ses considérations, RÉAUMUR avait proposé, en 1753 déjà, d'établir des sommes de température (ou températures cumulées) afin de déterminer les possibilités annuelles de récolte de blé dans la région parisienne. D'autres auteurs, et ils sont légion, ont utilisé la même idée à d'autres fins. Ainsi, PRIMAULT (1969) part, dans un premier temps, des sommes de température dans ses recherches sur le moment où certaines variétés de maïs-grain mûrissent.

Il serait donc tentant d'utiliser, ici aussi, des températures cumulées pour voir si le débourrement de nos deux arbres forestiers est déterminé par une certaine «quantité d'énergie» reçue depuis le premier janvier jusqu'au jour

où la phase phénologique retenue est atteinte.

Nous avons donc établi, année après année, les températures cumulées au-dessus de certains seuils entre le premier janvier et la date d'apparition de la phénophase retenue. Si nous prenons ici pour base de départ le premier janvier, c'est que, pour nos trois stations, il n'est pas apparu d'année où les seuils utilisés ont été systématiquement dépassés avant cette date.

A la figure 5, nous reportons les répartitions fréquentielles de ces valeurs selon le schéma décrit d'autre part (cf. PRIMAULT, 1978).

En traçant les courbes annuelles des températures cumulées entre le premier janvier et la date de débourrement et cela au-dessus d'une série de seuils thermiques, on n'obtient pratiquement jamais un point d'intersection unique indiquant et la somme recherchée et le seuil thermique déterminant (voir à ce propos les figures 2 à 7 dans PRIMAULT, 1991). Ceci se traduirait, dans la représentation utilisée à la figure 5 par la réunion sur une seule et même valeur des différentes limites fréquentielles.

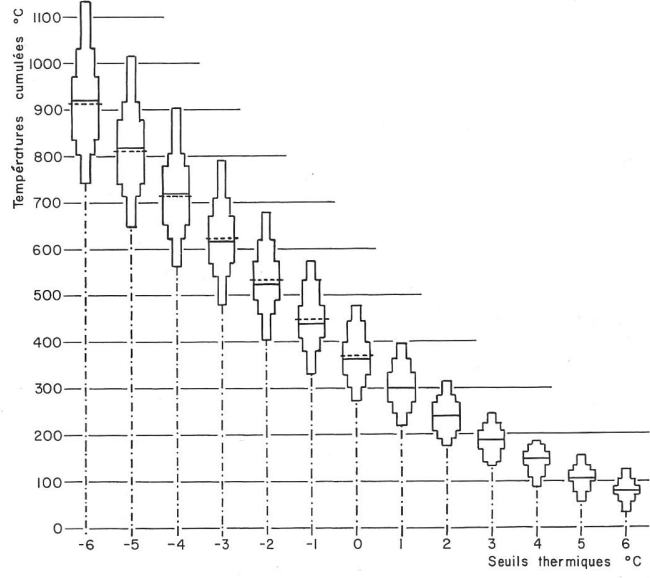
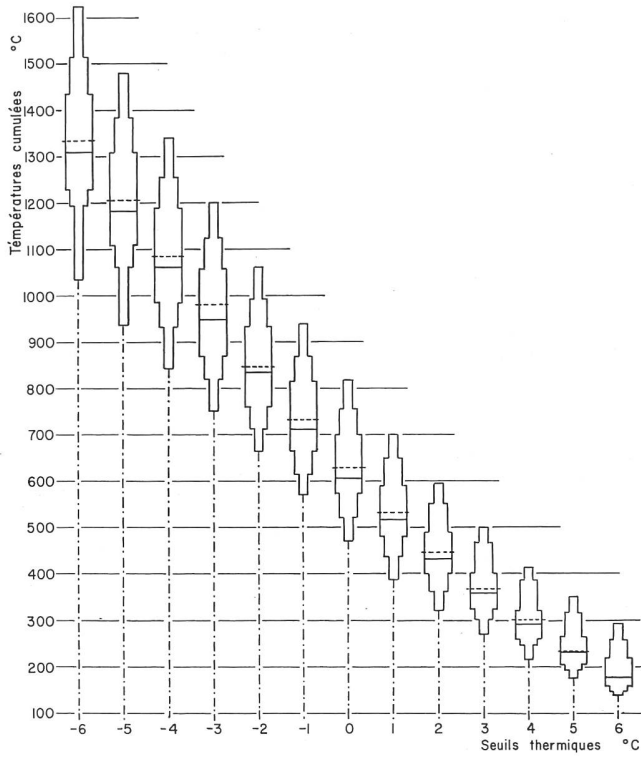


Figure 5: Répartitions fréquentielles des températures cumulées à Zurich. A gauche pour l'épicéa, à droite pour le mélèze.

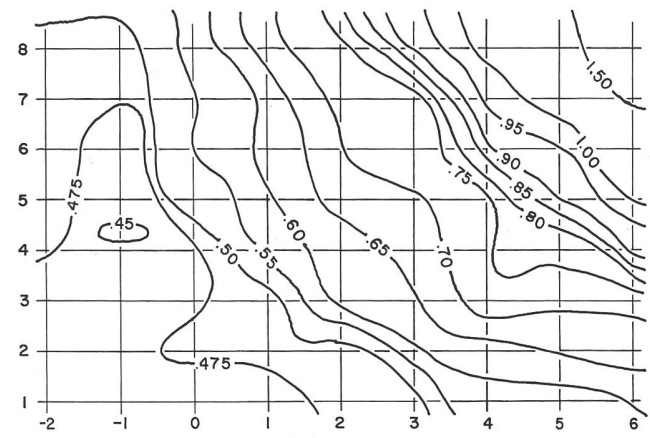
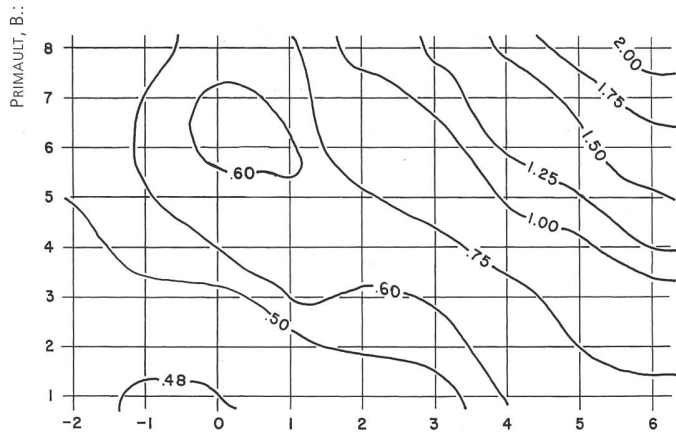


Figure 7: Facteur «R» en fonction de la durée de la période de carence (en ordonnée) et de la température de base (en abscisse). A gauche pour l'épicéa, à droite pour le mélèze.

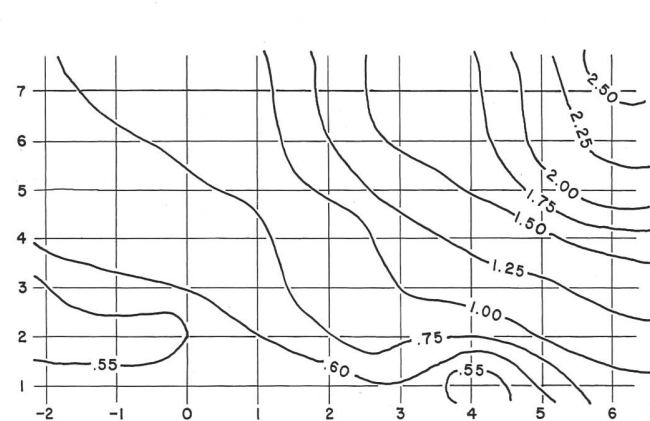
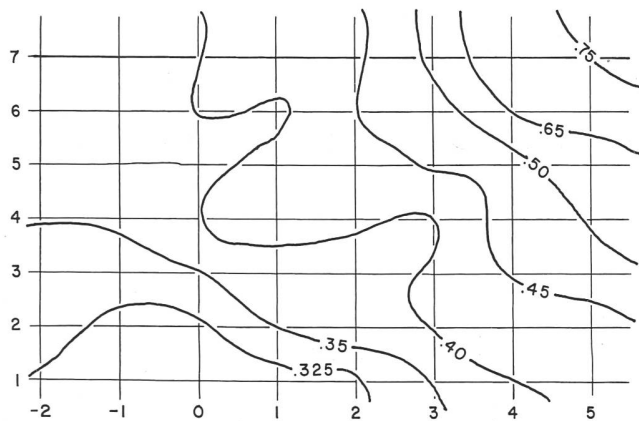


Figure 8: Facteur «R» en fonction de la durée de la période de carence et de la température de base à Einsiedeln. A gauche pour l'épicéa, à droite pour le mélèze.

Par conséquent, il avait fallu trouver un moyen permettant de fixer d'une manière la plus vraisemblable possible la position d'un «point de convergence» entre ces deux facteurs. Pour cela, on avait proposé le rapport entre la moyenne arithmétique de toutes les valeurs annuelles et l'amplitude totale (différence entre la plus grande et la plus petite somme) et cela pour chacun des seuils thermiques considérés. C'est ce que nous avons nommé le facteur «R» (de «rapport»; cf. à ce propos PRIMAULT, 1969). A la *figure 6*, nous en donnons le résultat en partant des chiffres représentés à la *figure 5*.

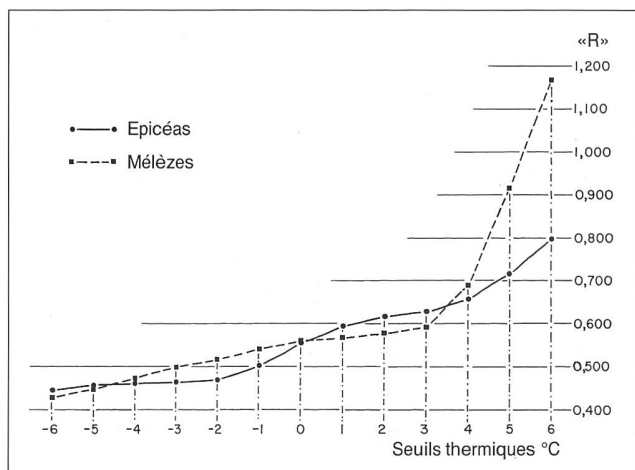


Figure 6: Facteur «R» découlant des mêmes définitions qu'à la figure 5.

5. Combinaison des deux démarches précédentes

5.1 A Zurich

Le modèle primitif était destiné à déterminer par le calcul le «début de la période de végétation» de l'épicéa dans diverses parties de notre pays. C'est donc par le débourement de cette essence que nous débiterons ici.

Partant des considérations énoncées ci-dessus, nous avons calculé le «début de la période de végétation» en faisant évoluer la période de carence de 1 à 8 jours et son seuil thermique de -4 à $+6$ °C. Pour chacun de ces points de grille, on a en outre calculé la somme des températures entre le premier janvier et la date calculée du débourement de l'épicéa et cela pour des seuils thermiques échelonnés de -6 °C à $+6$ °C. et déterminé le facteur «R» correspondant à chacun d'eux. A gauche de la *figure 7*, on donne le résultat de ces calculs.

On y voit que la valeur la plus faible de «R» ou, en d'autres termes, la plus grande probabilité d'une relation directe entre l'évolution de la température et le développement des arbres se rencontre par 4 jours et -1 °C. Nous sommes donc fort éloignés des 7 jours par 5 °C du modèle primitif. Notons cependant que l'on trouve un minimum secondaire peu marqué pour 4 jours et 5 °C.

Dans le premier cas, le seuil thermique correspondant est situé à -4 °C et la température cumulée moyenne y est de 1033 degrés/jours. On se rapproche ainsi de ce qu'avait signalé Item dans son analyse des relevés du PNR14+. Dans le second cas, le seuil est à $+4$ °C et la somme atteint 265 degrés/jours. Ceci est donc très proche de ce que proposait Jacquot.

Comme nous l'avons signalé plus haut, le mélèze ne suit probablement pas les mêmes règles que l'épicéa. Aussi avons-nous procédé de la même manière pour cette seconde essence. A droite de la *figure 7*, nous donnons sous la même forme l'évolution du facteur «R» en fonction de la durée de carence et de la température de base.

De cette figure, il semblerait que le mélèze a des capacités de réaction plus rapides que l'épicéa. En effet, le minimum de la valeur de «R» se trouve, ici aussi, par -1 °C, mais pour une période de carence de 1 jour seulement. Cette valeur correspond à une somme moyenne de température de 694 degrés pour un seuil thermique de -4 °C.

De ces chiffres, on peut déduire qu'il faut au mélèze non seulement des périodes de chaleur beaucoup plus courtes, mais aussi bien moins d'«énergie» qu'à l'épicéa pour se développer.

5.2 Deuxième conclusion intermédiaire

Ce qui précède est en parfaite contradiction avec ce qu'avaient montré les coefficients de corrélation (cf. chapitre 3.2). On peut tirer de ces figures que le modèle primitif n'est applicable à Zurich ni pour l'épicéa, ni pour le mélèze. Il faudrait donc y revoir tant la durée de la période de carence que la température-seuil, ce que nous avons déjà souligné plus haut.

5.3 A Einsiedeln

Comme pour Zurich, nous avons calculé les facteurs «R» pour diverses sommes de température correspondant à l'intervalle de temps qui sépare le premier janvier de la date calculée de l'apparition de la phase phénologique retenue et cela en faisant varier et la durée de la période de carence et le seuil de température relevant. Le résultat de ces calculs se trouve pour l'épicéa à gauche de la *figure 8*.

La valeur de «R» étant partout bien inférieure ici qu'à Zurich, il semble que cet arbre soit mieux en station dans les conditions ambiantes d'Einsiedeln que de celles qu'il rencontre sur le Plateau suisse.

On note en outre deux minimums de la valeur de «R» situés tous deux à une période de carence de 1 jour seulement, mais pour les seuils thermiques de -1 °C et $+1$ °C (somme moyenne de température de 945 °C, resp. de 942 °C degrés, tous deux pour un seuil thermique de -4 °C). Pourtant, ici aussi, on trouve un minimum secondaire pour une période de carence de 4 jours et une température de base de 3 °C.

A droite de la *figure 8*, nous donnons les mêmes valeurs, mais calculées pour le mélèze. Bien que nous y trouvions un minimum de la valeur de «R» pour une période de carence de 2 jours et une température de -1 °C, il n'atteint pas la valeur que nous avons fixée comme minimale pour être prise en considération, soit 0,500 au plus (0,547). Par conséquent, il semble ici que la méthode d'appréciation utilisée ne réponde pas aux exigences de notre démarche.

5.4 A Davos

Pour l'épicéa, la gauche de la *figure 9* nous montre que le minimum de la valeur de «R» se rencontre de nouveau pour une période de carence de 1 jour seulement et pour un seuil thermique situé entre -1 et 0 °C. (somme moyenne de température de 796 °C, resp. 790 °C, toujours pour un seuil thermique de -4 °C). Ce minimum est de 0,450, donc juste au-dessous de la valeur minimale exigée. Comme pour les deux autres stations, on trouve ici un minimum secondaire pour une période de carence de 4 jours et une température de base de 3 °C.

En ce qui concerne le mélèze, la droite de la *figure 9* présente un minimum du facteur «R» pour une période de carence de 2 jours et une température de référence comprise entre -1 et 0 °C. Pourtant, comme à Einsiedeln, ce minimum est situé bien au-dessus de ce que nous exigeons (0,615). Par conséquent, ces résultats ne semblent pas pouvoir servir de base à la poursuite de notre démarche.

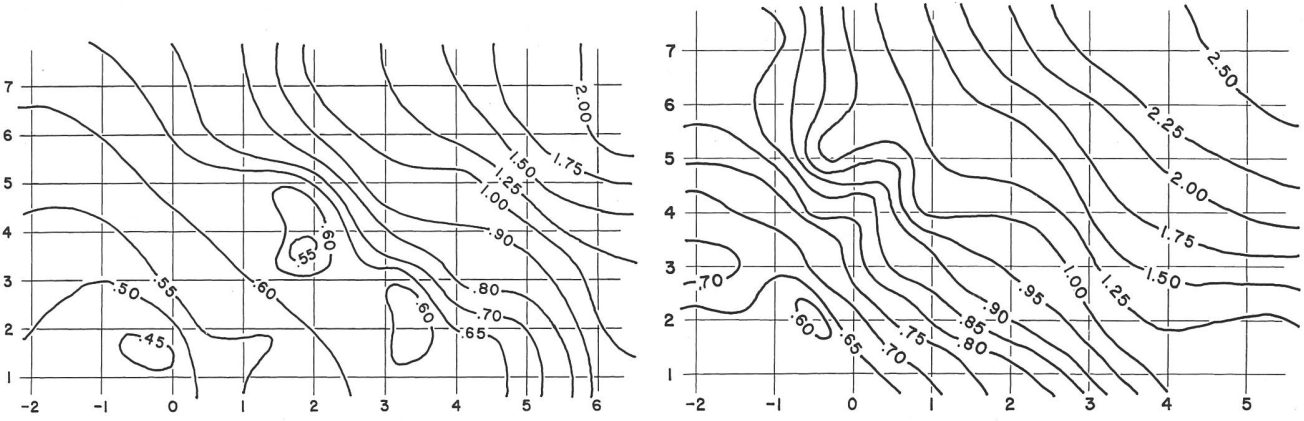


Figure 9: Facteur «R» en fonction de la durée de la période de carence et de la température de base. Davos. A gauche pour l'épicéa, à droite pour le mélèze.

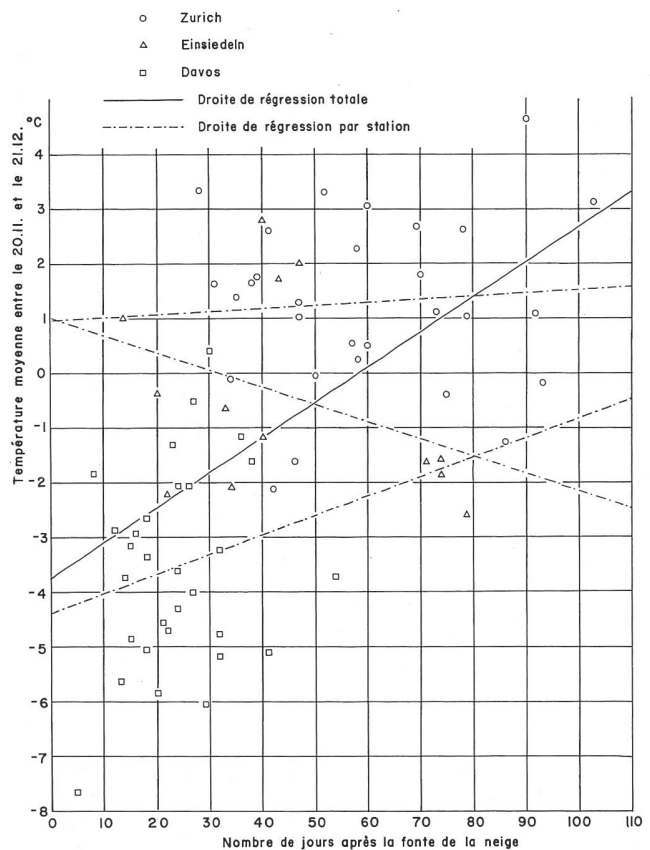
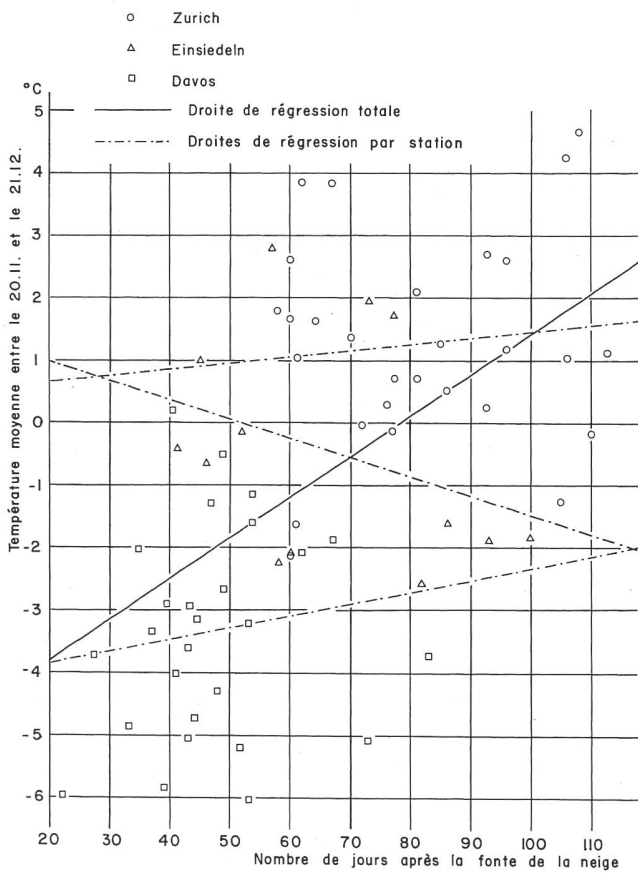


Figure 11: Relation entre la température moyenne des 30 jours précédant le solstice d'hiver et le nombre de jours entre la fonte de la neige et la date d'apparition du débournement. A gauche pour l'épicéa, à droite pour le mélèze.

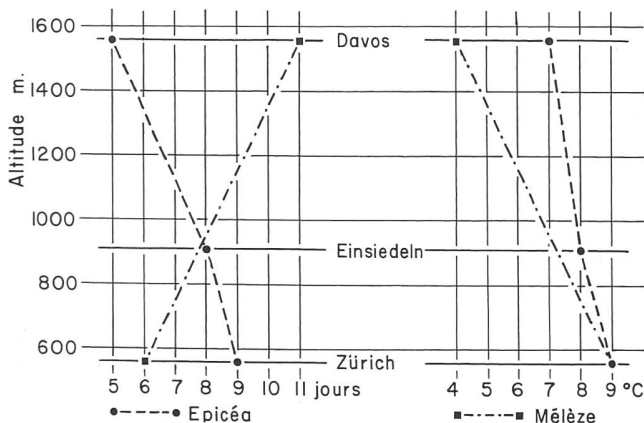


Figure 12: Nombre de jours de carence et températures de base en fonction de l'altitude des trois stations retenues.

5.5 Troisième conclusion intermédiaire

L'application du principe des températures cumulées lié aux variations et de la période de carence et de la température de base ne nous permet pas de tirer une conclusion significative sur la meilleure façon de modifier notre modèle afin d'en proposer un autre mieux applicable à notre propos.

En ce qui concerne l'épicéa, on pourrait envisager de réduire la période de carence à 4 jours et de faire varier la température de base en fonction de l'altitude selon une courbe voisine de celle proposée à la figure 10.

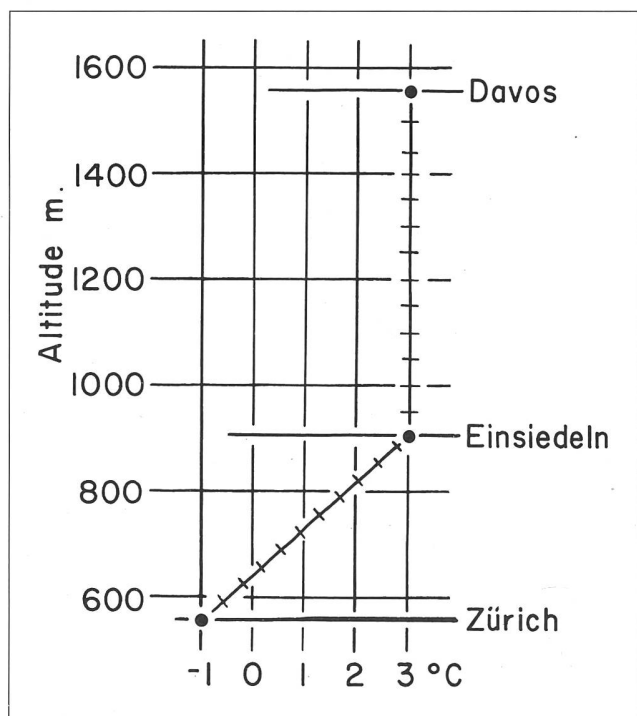


Figure 10: Variation de la température de base en fonction de l'altitude. Epicéa, période de carence de 4 jours.

Dans cette recherche, on est frappé du fait que partout la limite inférieure du seuil de température se situe à -4 °C, ce qui vient corroborer les résultats de Item, et cela aussi bien pour l'épicéa que pour le mélèze. Malgré cela, il faut rechercher une autre approche.

6. Influence possible de la température ou de l'insolation pré-hivernale

6.1 Influence directe sur la date d'apparition de phénophases

Partant des constatations faites par BUYS et KOTSE (1963) pour la date de floraison des pêchers en Afrique du Sud, idée reprise plus tard par PRIMAULT (1970) pour celle des abricotiers du Valais, nous avons recherché si une relation semblable se retrouvait dans le débourrement de nos arbres forestiers.

Ainsi, nous avons, dans un premier temps, mis en relation la température moyenne des 30 jours précédant le solstice d'hiver et la date du débourrement de nos deux espèces forestières.

Si, dans un cas comme dans l'autre, on trouve une corrélation hautement significative entre ces deux valeurs pour la totalité des points obtenus (les trois stations confondues), il n'en va pas du tout de même en examinant ces stations séparément. Dans cette seconde optique, les corrélations ne sont plus significatives du tout (voir tableau 1).

Tableau 1: Coefficients de corrélation entre la température moyenne des 30 jours précédant le solstice d'hiver et la date de débourrement de l'épicéa et du mélèze.

Débourrement de l'épicéa	Nombre de paires	Coefficient de corrélation	Signification contre 0:
Zurich	28	0,151	0,1 *
Einsiedeln	13	0,200	0,05 **
Davos	27	0,456 ***	0,01 ***
Les 3 ensemble	68	-0,607 ****	0,001 ****
Débourrement du mélèze			
Zurich	29	-0,030	
Einsiedeln	13	-0,150	
Davos	30	0,188	
Les 3 ensemble	72	-0,622 ****	

Par conséquent, il ressort de ces calculs qu'il n'y a vraisemblablement pas de similitude entre les réactions des arbres fruitiers et forestiers, au moins en ce qui concerne la floraison dans le premier cas, le débourrement dans le second. Il s'agit en effet de deux états physiologiquement fort différents.

On peut en tirer que, non seulement le déclenchement d'une phase phénologique déterminée ne répond pas aux mêmes impacts de l'environnement, mais aussi que la réaction est propre à l'espèce végétale.

6.2 Influence de la couverture de neige

Dans un des travaux cités plus haut (PRIMAULT, 1970), nous avons mis en évidence le fait qu'une couverture de neige décalait la relation trouvée par Buys et Kotse, tout au moins en ce qui concerne la floraison de l'abricotier en Valais.

Reprenant cette idée, nous avons établi, pour chacune de nos trois stations, la date à laquelle le sol n'est plus recouvert de neige. Dans cette recherche, une difficulté a surgi pour la station de Zurich et, dans une mesure moindre, pour celle d'Einsiedeln. Il s'agit du fait que, au printemps, on rencontre très souvent des retours de froid accompagnés de chutes de neige qui recouvrent le sol durant quelques jours, voire un seul. A Davos, cette configuration ne se présente pratiquement jamais. Dans ces cas-là, on n'a retenu que les périodes où la nouvelle couche s'est maintenue au moins 3 jours consécutifs (1 cm ou davantage sur la planche à neige).

Partant alors non plus du 1^{er} janvier, mais de la date de fonte de la neige au sol, nous avons établi la même relation, à savoir celle qui existe entre la température moyenne des 30 jours précédant le solstice d'hiver et la différence entre la date de fonte et celle d'apparition de la phase phénologique retenue (figure 11).

6.3 Quatrième conclusion intermédiaire

Comme nous l'avons mentionné déjà, la phase phénologique retenue ici, débourrement, d'une part, celle envisagée par Buys et Kotse ou par Primault, floraison, d'autre part correspondent à des états physiologiques fort différents de la plante. Il n'est donc pas étonnant de constater que le modèle retenu ne donne pas de solution acceptable dans le cas de notre démarche.

6.4 Faire varier la durée

Aux chapitres 6.1 et 6.2, nous nous sommes contenté d'examiner les répercussions de la même période qu'avaient utilisée tant Buys et Kotse que Primault, à savoir les 30 jours qui précèdent le solstice d'hiver. Toutefois, et comme nous le relevons plus haut déjà, il s'agit dans les deux cas de phénomènes physiologiques fondamentalement différents l'un de l'autre:

Tableau 2: Coefficient de corrélation entre la température moyenne des 10, 15, 20,....., 60 jours précédant le solstice d'hiver et la date de débourrement. A gauche pour l'épicéa, à droite pour le mélèze.

N	28	13	27	68	N	29	13	30	72
j.	Zurich	Einsiedeln	Davos	Total	j.	Zurich	Einsiedeln	Davos	Total
10	0,147	-0,078	0,148	-0,599****	10	-0,289	-0,061	0,158	-0,602****
15	0,262	0,241	0,265	-0,556****	15	-0,181	-0,196	0,234	-0,571****
20	0,172	0,068	0,379**	-0,545****	20	-0,118	-0,217	0,195	-0,584****
25	0,085	0,156	0,421**	-0,565****	25	-0,063	-0,257	0,168	-0,605****
30	0,138	0,188	0,456**	-0,604****	30	-0,065	-0,175	0,186	-0,645****
35	0,101	0,102	0,443**	-0,659****	35	-0,136	-0,145	0,130	-0,699****
40	0,112	0,083	0,452**	-0,676****	40	-0,173	-0,219	0,199	-0,721***
45	0,063	0,122	0,458**	-0,693****	45	-0,092	-0,348	0,165	-0,722****
50	0,099	0,204	0,419**	-0,706****	50	-0,022	-0,378	0,165	-0,726****
55	0,015	0,183	0,374**	-0,726****	55	0,029	-0,392	0,135	-0,730****
60	-0,034	0,147	0,383**	-0,736****	60	0,035	-0,426	0,154	-0,735****

Tableau 3: Coefficient de corrélation entre la température moyenne des 10, 15, 20,....., 60 jours précédant le solstice d'hiver et le nombre de jours séparant la fonte de la neige et le débourrement. A gauche pour l'épicéa, à droite pour le mélèze.

N	28	13	27	68	N	29	13	30	72
j.	Zurich	Einsiedeln	Davos	Total	j.	Zurich	Einsiedeln	Davos	Total
10	0,042	-0,486*	-0,035	0,454****	10	-0,137	-0,420	0,151	0,429****
15	0,067	-0,360	-0,066	0,468****	15	-0,080	-0,436	0,200	0,449****
20	0,079	-0,279	0,065	0,482****	20	-0,020	-0,323	0,203	0,475****
25	0,089	-0,235	0,186	0,521****	25	0,046	-0,320	0,308*	0,520****
30	0,119	-0,325	0,162	0,547****	30	0,062	-0,385	0,243	0,543****
35	0,073	-0,316	0,191	0,571****	35	0,000	-0,345	0,192	0,558****
40	0,021	-0,269	0,212	0,580****	40	-0,079	-0,319	0,138	0,552****
45	-0,010	-0,224	0,210	0,587****	45	-0,065	-0,326	0,152	0,566****
50	-0,032	-0,313	0,176	0,581****	50	-0,079	-0,435	0,128	0,559****
55	0,006	-0,321	0,194	0,596****	55	-0,029	-0,440	0,114	0,570****
60	0,055	-0,245	0,238	0,618****	60	0,050	-0,373	0,169	0,597****

Tableau 4: Coefficient de corrélation entre la somme de l'insolation (en heures) des 10, 15, 20,....., 60 jours précédant le solstice d'hiver et la date de débourrement. A gauche pour l'épicéa, à droite pour le mélèze.

N	28	13	27	68	N	29	13	30	72
j.	Zurich	Einsiedeln	Davos	Total	j.	Zurich	Einsiedeln	Davos	Total
10	-0,015	0,045	-0,068	0,510****	10	-0,266	0,035	0,042	0,353***
15	-0,030	-0,072	-0,161	0,541****	15	-0,265	0,272	-0,112	0,427****
20	0,207	0,208	0,092	0,649****	20	-0,016	0,118	0,101	0,546****
25	0,233	0,282	0,150	0,664****	25	0,067	0,053	0,088	0,559****
30	0,219	0,308	0,095	0,709****	30	0,107	0,023	0,123	0,591****
35	0,279	0,325	0,128	0,738****	35	-0,009	0,173	0,191	0,639****
40	0,335*	0,291	0,200	0,756****	40	0,033	0,237	0,264	0,667****
45	0,320*	0,447*	0,218	0,766****	45	0,074	0,112	0,288	0,680****
50	0,301	0,526**	0,191	0,767****	50	0,156	0,018	0,293	0,699****
55	0,268	0,414	0,149	0,744****	55	0,152	0,045	0,291	0,705****
60	0,222	0,393	0,130	0,727****	60	0,148	0,026	0,237	0,680****

Tableau 5: Coefficient de corrélation entre la somme de l'insolation (en heures) des 10, 15, 20,....., 60 jours précédant le solstice d'hiver et le nombre de jours séparant la fonte de la neige du débourrement. A gauche pour l'épicéa, à droite pour le mélèze.

N	28	13	27	68	N	29	13	30	72
j.	Zurich	Einsiedeln	Davos	Total	j.	Zurich	Einsiedeln	Davos	Total
10	0,147	-0,106	0,098	-0,372***	10	0,124	-0,096	0,098	-0,308***
15	0,353*	-0,168	0,132	-0,381***	15	0,245	-0,052	0,071	-0,345***
20	0,259	-0,420	0,081	-0,456****	20	0,214	-0,393	0,072	-0,431****
25	0,275	-0,347	0,109	-0,445****	25	0,200	-0,368	0,061	-0,447****
30	0,246	-0,294	0,141	-0,488****	30	0,273	-0,337	0,105	-0,459****
35	0,166	-0,282	-0,016	-0,539****	35	0,143	-0,290	0,067	-0,498****
40	0,084	-0,207	-0,030	-0,550****	40	0,073	-0,197	0,091	-0,500****
45	0,010	-0,246	-0,075	-0,569****	45	0,083	-0,310	0,045	-0,516****
50	-0,087	-0,289	-0,063	-0,585****	50	0,019	-0,395	0,051	-0,546****
55	-0,091	-0,281	0,009	-0,571****	55	0,001	-0,350	0,085	-0,547****
60	0,030	-0,231	0,078	-0,527****	60	0,056	-0,305	0,116	-0,519****

floraison d'une part, débourrement d'autre part. Il se pourrait donc fort bien que la durée des périodes déterminantes soit différente elle aussi sans que le mécanisme de base diffère notablement.

Nous avons donc calculé le coefficient de corrélation entre d'une part la température moyenne de périodes de 10 à 60 jours précédant le solstice d'hiver, périodes échelonnées de 5 en 5 jours et d'autre part la date de débourrement de l'année suivante. Le résultat en est consigné au *tableau 2*.

Seuls les chiffres de Davos pour l'épicéa indiquent une certaine relation. La signification contre zéro n'y est pourtant pas inférieure à 0,05.

Si, tenant compte des constatations faites en Valais pour la floraison de l'abricotier et qu'au lieu de tenir compte de la date de débourrement observée, nous considérons le nombre de jours séparant la fonte de la neige et l'apparition de la phénophase, les résultats ne sont pas plus convaincants, au contraire (voir *tableau 3*)!

6.5 Cinquième conclusion intermédiaire

Même la durée de la période de calcul des moyennes de température de l'arrière-automne n'apporte pas de solution à notre recherche. Il s'ensuit que cette voie doit être abandonnée elle aussi.

6.6 Et la durée d'insolation de l'arrière-automne?

Un autre élément météorologique qui peut influencer le développement de la végétation est le rayonnement. Pour parer au manque de mesures spécifiques de cette valeur et couvrant de longues périodes, on se sert souvent des relevés de la durée d'insolation. Il y a en effet une relation très étroite entre ces deux données.

Si la température moyenne d'une période donnée ayant précédé le solstice d'hiver est déterminante pour la date de floraison de certains arbres fruitiers, on pourrait imaginer que l'insolation puisse se répercuter sur le débourrement d'arbres forestiers.

Partant de cette réflexion, nous avons repris le schéma décrit sous 6.4, mais en y substituant la durée d'insolation à la température moyenne. Les résultats obtenus sont consignés aux *tableaux 4 et 5*.

On ne trouve cependant ici aucun indice nous permettant de corroborer cette hypothèse.

6.7 Sixième conclusion intermédiaire

Comme démontré plus haut pour la température moyenne, il ressort aussi que la durée d'insolation de l'arrière-automne ne préfigure en rien un débourrement précoce ou, au contraire, tardif de nos deux essences forestières l'année suivante. Il faut donc suivre une autre démarche.

7. Combinaison de divers éléments

7.1 Détermination du seuil le plus probable; pour les températures cumulées

Au chapitre 4, nous avons développé l'idée que les températures cumulées pouvaient apporter une solution au problème posé. La *figure 5* donne une représentation échelonnée de degré en degré des résultats obtenus.

Dans notre démarche concernant le maïs-grain déjà citée d'autre part (PRIMAULT, 1969), nous avons cependant souligné qu'une telle procédure n'était souvent pas suffisante pour déterminer avec précision le seuil thermique pertinent pour

les intervalles séparant les phénophases retenues alors (germination, première feuille, cinquième feuille, floraison mâle, 40% d'humidité du grain).

Reprenant alors nos résultats précédents (minima respectifs de la *figure 6*), nous avons calculé la valeur de «R» non plus de degré en degré, mais de dixième en dixième de part et d'autre de ces minima (*tableau 6*).

C'est de ces valeurs que découle la suite de nos calculs.

7.2 Températures cumulées et insolation

Dans ses recherches, GESLIN (1944 et 1952) avait émis l'idée que, pour déterminer la quantité de blé produite chaque année dans la région parisienne, la température, même si elle jouait un rôle prépondérant, n'était qu'un des éléments météorologiques déterminants. Il y ajoutait la durée d'insolation et obtenait alors ce qu'il a appelé l'«indice héliothermique».

Dans nos travaux sur la recherche de la date probable de maturation du maïs-grain, nous avons repris cette idée fondamentale et l'avons appliquée, mais en pondérant la valeur de l'insolation (voir PRIMAULT, 1969). Nous présentions alors un procédé graphique qui se justifiait en raison du nombre relativement peu important d'années en discussion.

Dans le cas présent, le nombre de courbes disponibles est beaucoup plus important. C'est la raison pour laquelle, nous ne donnons que les valeurs calculées de «R». Ces résultats sont consignés au *tableau 7*.

Pour l'épicéa, on n'obtient d'amélioration ni à Zurich, ni à Davos, les valeurs de «R» y étant toujours plus élevées que dans le cas des seules températures cumulées. A Einsiedeln par contre, on obtient un minimum inférieur pour un ensoleillement pondéré par 0,1. Mais la barre de 0,5 pour «R» était déjà franchie sans un deuxième élément.

Pour le mélèze, il en va de même, sauf que la pondération de l'insolation se trouve à 0,3 pour Einsiedeln.

7.3 Températures cumulées et précipitations

Dans notre travail déjà maintes fois cité sur la date de maturité du maïs-grain, nous avons relevé que le modèle devait aussi tenir compte des précipitations. Il s'agissait en effet le plus souvent de phénophases se rencontrant en été, c'est-à-dire en une saison où l'absence d'eau dans le sol joue un rôle déterminant pour le développement des plantes, surtout si ces dernières sont annuelles.

Partant de cette constatation, nous avons procédé comme au chapitre précédent, mais en ajoutant aux températures cumulées non plus la durée d'insolation pondérée, mais la somme des précipitations, pondérée elle aussi. Les résultats obtenus figurent au *tableau 8*.

Ces calculs n'apportent aucune précision supplémentaire. Cela n'est pas étonnant. En effet au point de départ de la période considérée (le sol libéré de sa couverture de neige), le sol est gorgé de l'eau de fonte. En outre, la période considérée (fonte de la neige, apparition de la phase phénologique) est généralement trop courte pour permettre une dessiccation du sol suffisante pour soumettre les arbres à une contrainte de sec et cela même si on n'enregistre aucune précipitation durant tout ce laps de temps.

7.4 Températures cumulées, durée d'insolation et précipitations

Pour être complet et en suivant pas à pas notre démarche antérieure concernant le maïs-grain et cela nonobstant les résultats décevants, mais nullement inattendus, signalés sous 7.2 et 7.3, nous avons établi des sommes complètes. Celles-ci

Tableau 6: Détermination de la pondération la plus probable des sommes de température autour du minimum relevé plus haut (facteur «R»).

Essence/ Station	N	X °C	X-0,6	X-0,5	X-0,4	X-0,3	X-0,2	X-0,2	X	X+0,1	X+0,2	X+0,3	X+0,4	X+0,5	X+0,6
Epicéa															
Zurich	28	4,0	1,250	1,248	1,245	1,242	1,239	1,236	1,233	1,229	1,226	1,222	1,223	1,226	1,229
Einsiedeln	14	4,0	0,397	0,392	0,386	0,381	0,379	0,375	0,373	0,356	0,354	0,356	0,357	0,358	0,358
Davos	27	0,0	0,877	0,876	0,875	0,874	0,873	0,872	0,873	0,876	0,879	0,882	0,885	0,888	0,892
Mélèze															
Zurich	26	2,0	1,572	1,566	1,558	1,551	1,543	1,535	1,527	1,523	1,526	1,529	1,532	1,535	1,538
Einsiedeln	14	-11,0	0,590	0,590	0,591	0,591	0,591	0,591	0,592	0,592	0,593	0,593	0,593	0,594	0,594
Davos	30	-3,0	1,500	1,495	1,490	1,484	1,479	1,473	1,468	1,469	1,471	1,472	1,474	1,475	1,477

Tableau 7: Détermination de la pondération la plus probable des sommes de l'insolation en partant des sommes de température pondérées (valeurs de «R»).

Essence/ Station	N	TB	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Epicéa												
Zurich	28	4,3	1,295	1,295	1,326	1,348	1,366	1,387	1,380	1,417	1,432	1,441
Einsiedeln	14	4,2	0,327	0,332	0,336	0,338	0,340	0,342	0,344	0,345	0,346	0,347
Davos	27	-0,1	0,886	0,884	0,900	0,913	0,927	0,936	0,946	0,955	0,963	0,970
Mélèze												
Zurich	26	2,1	1,522	1,522	1,523	1,524	1,525	1,526	1,548	1,567	1,588	1,603
Einsiedeln	14	-11,6	0,586	0,574	0,566	0,569	0,573	0,576	0,580	0,583	0,586	0,589
Davos	30	-3,0	1,495	1,497	1,509	1,521	1,530	1,541	1,550	1,558	1,566	1,572

Tableau 8: Détermination de la pondération la plus probable des sommes de précipitations en partant des sommes de température pondérées (valeurs de «R»).

Essence/ Station	N	TB	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Epicéa												
Zurich	28	4,3	1,265	1,310	1,352	1,382	1,412	1,441	1,465	1,490	1,522	1,531
Einsiedeln	14	4,2	0,512	0,562	0,618	0,677	0,715	0,749	0,772	0,799	0,819	0,835
Davos	27	-0,1	0,799	0,886	0,891	0,899	0,98	0,916	0,924	0,933	0,947	0,957
Mélèze												
Zurich	26	2,1	1,522	1,559	1,600	1,623	1,648	1,678	1,712	1,752	1,797	1,855
Einsiedeln	14	-11,6	0,598	0,622	0,647	0,664	0,680	0,702	0,719	0,737	0,751	0,768
Davos	30	-3,0	1,465	1,485	1,497	1,502	1,509	1,516	1,524	1,529	1,535	1,541

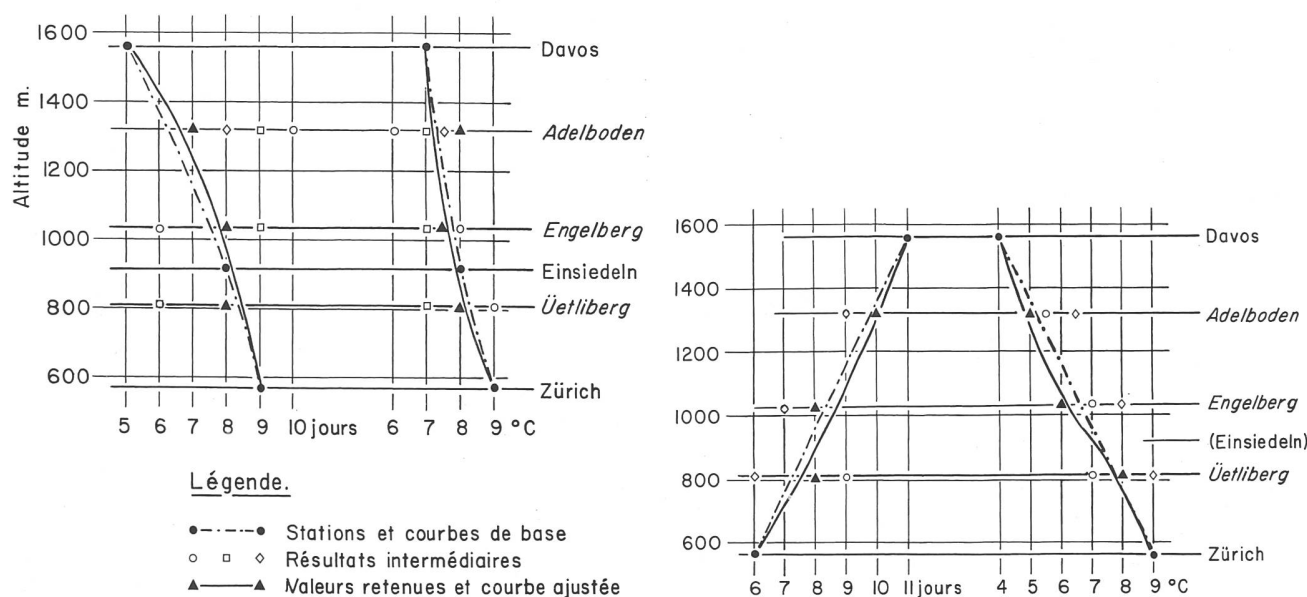


Figure 13: Nombre de jours de la période de carence et températures de base en fonction de l'altitude A gauche pour l'épicéa (6 stations), à droite pour le mélèze (5 stations).

partent des températures cumulées au-dessus des seuils déterminés sous 7.1. On leur a ajouté les sommes d'insolation pondérées selon les chiffres obtenus sous 7.2. De là, on a ajouté les sommes de précipitations, pondérées elles aussi.

Ces calculs n'apportent pas de meilleure solution que précédemment, aussi nous renonçons à en donner le résultat complet.

7.5 Septième conclusion intermédiaire

Si la méthode utilisée pour déterminer les besoins météorologiques au développement et à la maturation de certaines variétés de maïs-grain avait donné des résultats utilisables et conduit au tracé de cartes de production (PRIMAULT, 1972b et 1972c), elle n'est pas envisageable dans le cas présent.

Une raison pour cela est la différence fondamentale entre les deux sortes de plantes: le maïs est une plante annuelle, le mélèze et l'épicéa sont des plantes pérennes. Les seuls impacts de l'année en cours déterminent le développement des premières. Celui des secondes peut être influencé par des conditions météorologiques de l'année précédente, voire de plusieurs années antérieures. Dans son étude sur la formation des bourgeons du hêtre (*Fagus sylvatica* L.), ROLOFF (1986) montre qu'il faut quatre ans à ceux-ci avant leur débourrement.

Nous ne connaissons pas d'étude similaire dans le cas de nos deux essences forestières, mais il nous paraît vraisemblable que la formation des bourgeons nécessite de longues périodes, en tous cas l'automne précédent. Dans cette optique, la seule période précédant le solstice d'hiver utilisée au chapitre 5, si longue soit-elle, ne saurait suffire. Il faudrait alors envisager non plus un critère astronomique accompagné d'un certain nombre de jours, mais de limites météorologiques, comme nous l'avions fait déjà par le passé (PRIMAULT, 1954; PRIMAULT et FANKHAUSER, 1988). Une telle idée sera peut-être reprise à l'avenir.

8. Recherche par de nouvelles considérations

Les démarches exposées jusqu'ici démontrent que seule la comparaison des coefficients de corrélation peut apporter une vision suffisamment claire pour notre propos. En outre, il semble que la limite de 5 °C adoptée à l'origine et jusqu'ici est trop basse, au moins en ce qui concerne l'épicéa en plaine et en moyenne montagne (Zurich et Einsiedeln).

Dès lors, et en s'appuyant sur la manière de faire décrite au chapitre 5, on a recherché la plage où le coefficient de corrélation était le plus élevé. Pour ne conserver que des valeurs les plus significatives, on a retenu comme limite inférieure une signification contre zéro de 0,001 au moins.

Pour ne pas surcharger, nous ne donnerons pas ici les figures concernant chaque espèce et chaque lieu. Celles-ci sont comparables aux figures 7, 8 et 9 présentées plus haut au chapitre 5. Nous nous contenterons ici du résultat final.

Nous l'avons reporté graphiquement à la *figure 12* et cela en fonction de l'altitude de nos trois stations. De ce tableau, on peut tirer que, pour l'épicéa tout au moins, on trouve une cohérence évidente. Quant au mélèze, s'il donne des résultats apparemment utilisables à Zurich et à Davos, il n'en va pas de même pour Einsiedeln.

8.1 Huitième conclusion intermédiaire

Les températures nécessaires au débourrement tant de l'épicéa que du mélèze sont, en plaine, plus élevées que ce que nous avons admis à l'origine.

Le fait démontré par Item que l'épicéa assimile le CO₂ à une température de -4 °C déjà ne semble avoir aucune influence sur la rapidité de son débourrement. Il en va de même pour le mélèze.

En plaine, il faut plus de 7 jours «chauds» (température moyenne journalière égale ou dépassant la limite thermique définie plus haut) consécutifs pour voir l'épicéa débourrer.

9. Comparaison avec d'autres stations

A la *figure 12*, nous avons trois points pour l'épicéa, deux pour le mélèze. Une telle configuration ne nous permet de tracer que des courbes très approximatives. Ces courbes donnent cependant une première indication quant aux fluctuations avec l'altitude tant de la durée de la période de carence que de la température minimum indispensable au développement de nos deux espèces végétales.

Pourtant, deux, respectivement trois points nous semblent insuffisants pour étayer notre démarche et présenter une méthode valable au moins pour la Suisse et cela au nord des Alpes seulement. Aussi avons-nous recherché des stations situées à des altitudes intermédiaires, mais toujours dans des conditions similaires aux trois premières (voir *figure 13*).

Pour ce faire, nous avons retenu les points suivants: Uetliberg (814 m), Engelberg (1035 m) et Adelboden (1320 m). Ces trois stations disposent tant de relevés phénologiques que météorologiques permettant un traitement identique à celui appliqué aux trois premières stations considérées.

Partant de la dernière figure, on a extrait pour chacune de ces trois nouvelles stations une durée de carence et une température de base, toutes deux provisoires. On a ensuite calculé les coefficients de corrélation entre les dates calculées et observées pour un certain nombre de jours précédant et suivant la valeur provisoire ainsi que pour des températures supérieures et inférieures à celles qui découlaient des courbes.

On a ainsi un champ d'investigation situé autour de chaque point. De ce champ, on n'a retenu que les coefficients de corrélation correspondant à une signification contre zéro d'au moins 0,01. Au besoin, on a effectué encore des calculs correspondant à des températures échelonnées de 0,5 en 0,5 °C.

9.1 Epicéa

A gauche de la *figure 13*, on trouve ces différentes solutions réunies. Il est alors possible d'adapter les courbes primitives, tant en ce qui concerne la durée de la période de carence que la température minimum indispensable au débourrement de cette essence.

Seule la station de l'Uetliberg diffère légèrement (1 °C environ) de la courbe idéale.

9.2 Mélèze

A la *figure 12*, nous ne disposons pas de valeur utilisable pour Einsiedeln. Aussi, la courbe retenue a été tracée en s'appuyant sur ce que nous avons trouvé pour l'épicéa.

Nous avons alors procédé de la même façon que décrit plus haut au chapitre 9.1. Il en est résulté la *figure 13* à droite. On voit alors que les nouvelles courbes adaptées sont parfaitement utilisables.

Pourtant, contrairement à ce que nous avions pour l'épicéa, la période de carence augmente ici avec l'altitude, alors qu'elle diminuait pour l'autre essence. La courbe des températures se comporte, elle, de la manière attendue.

10. Conclusions finales

Au début de notre démarche, nous étions parti de l'idée que la réalisation d'un modèle découlant à la fois d'une période de carence et d'une température de base était réalisable. Pourtant, il nous avait semblé que ces deux valeurs ne sauraient s'appliquer de façon uniforme à différentes essences végétales et à n'importe quelle altitude. Nous avons alors recherché dans quelles conditions ces deux termes devaient varier.

10.1 Pour l'épicéa

L'hypothèse émise par ENGLER en 1907 déjà et selon laquelle les races de montagne réagissent plus rapidement aux variations printanières de la température que celles de plaine se trouve ici confirmée.

En effet, plus on s'élève et plus la période de carence se trouve écourtée et cela de façon quasi linéaire (9 jours à Zurich contre 5 à Davos).

Quant à la température de base, elle diminue elle aussi avec l'altitude mais de façon moins linéaire tout en restant dans des limites étroites (9 °C à Zurich, contre 7 °C à Davos).

10.2 Pour le mélèze

Les conclusions de BURGER (1935) ne se trouvent confirmées que en ce qui concerne la température de base. Contrairement à l'épicéa, le mélèze semble réagir beaucoup plus sensiblement à la température ambiante qu'à la durée de périodes chaudes. Ainsi, à Davos, elle est de 4 °C seulement, alors qu'à Zurich il faut à ces arbres une température de 9 °C pour réagir. Les stations intermédiaires se placent, elles, très près de la courbe primitive.

Par contre, la période de carence augmente ici avec l'altitude et cela de façon significative: 6 jours à Zurich contre 11 jours à Davos.

Par conséquent, il semble qu'il faut une plus longue période à une température plus basse pour que la race de montagne débouresse alors que celle de plaine nécessite une température plus élevée, mais une période plus courte pour atteindre la même phase phénologique.

10.3 En résumé

On peut utiliser un modèle similaire à celui proposé initialement afin de calculer rétrospectivement la date de débouressement de nos deux essences en utilisant un seul facteur météorologique: la température moyenne journalière.

Le modèle retenu est valable ici aussi bien pour l'épicéa que pour le mélèze. Les facteurs «durée de la période de carence» et «température de base» sont différents pour chaque essence et varient en outre avec l'altitude.

Nos conclusions se basent uniquement sur l'étude de stations situées en Suisse et au nord des Alpes. Les courbes que nous avons établies, voire la constitution du modèle lui-même ne sont peut-être plus valables au sud de celles-ci ou dans d'autres régions de l'arc alpin, c'est-à-dire dans des conditions extérieures où des races particulières ont pu être sélectionnées naturellement soit par la roche-mère (siliceuse ou calcaire par exemple), soit par des configurations climatiques particulières.

Résumé

Il y a de nombreuses années, on avait élaboré un modèle devant permettre de calculer rétrospectivement le «début de la période de végétation» en partant des relevés de la seule température de l'air (7 jours consécutifs à +5 °C de température moyenne au moins). Il s'agissait maintenant de confronter ce modèle à des données phénologiques. Une première mise en parallèle des dates calculées et observées montre que le modèle primitif ne donne pas une image fidèle du moment du débouressement de deux essences forestières: l'épicéa et le mélèze. Pour essayer de se rapprocher de la réalité, on a fait varier séparément les deux paramètres du modèle (durée et température), pourtant sans résultat probant. On a recherché ensuite si ces deux essences obéissaient à l'impact de températures cumulées au-dessus d'une série de seuils, pourtant sans plus de succès. Partant de constatations se rapportant à la floraison d'arbres fruitiers, on a recherché si la température ou l'insolation de diverses périodes qui précèdent le solstice d'hiver influençaient la date de débouressement des deux essences. Pour cela, on a tenu compte du nombre de jours séparant l'apparition de la phase phénologique tant du premier janvier que de la fonte des neiges. Ici aussi, il n'y a pas de relation statistique. Comme dans de nombreuses recherches en météorologie agricole, on a ensuite examiné si des températures cumulées associées à des durées d'insolation, des précipitations ou les deux ensemble et cela en appliquant diverses pondérations à chacun de ces paramètres apportaient une solution. Ces calculs n'ont pas conduit, eux non plus, aux résultats escomptés. Les différentes démarches décrites ci-dessus se basaient sur les données de trois stations du nord des Alpes étagées entre 570 et 1560 m d'altitude. Revenant à l'idée du modèle primitif, on a alors tracé pour chaque essence une première liaison entre les deux paramètres pris séparément et l'altitude des stations. Les données provenant de trois autres stations intermédiaires permettent d'apporter de très légères corrections à ces courbes et d'obtenir ainsi des modèles spécifiques pouvant s'appliquer aux deux essences retenues. Il est ainsi possible de calculer rétrospectivement des dates phénologiques non observées directement. Ces résultats ne sont cependant utilisables que sur le versant nord des Alpes suisses, pour le moment tout au moins.

Zusammenfassung

Anwendung meteorologischer Modelle zur Berechnung des Beginns zweier phänologischer Phasen

Vor vielen Jahren wurde ein Modell zur Berechnung des «Frühlingsanfangs» entwickelt. Dieses Modell basierte ausschliesslich auf dem Temperaturverlauf (sieben aufeinander folgende Tage mit mindestens +5 °C mittlerer Temperatur). Man versuchte die Resultate solcher Berechnungen mit phänologischen Daten zu vergleichen: mit dem Austrieb von Fichten und Lärchen. Das Ergebnis war unbefriedigend. Man versuchte dann die zwei Parameter des ursprünglichen Modells (Temperatur und Anzahl Tage) unabhängig von einander variieren zu lassen, jedoch ohne besseren Erfolg. Die Idee der Temperatursummen über verschiedenen Grundtemperaturen wurde dann, wiederum erfolglos, angewendet. Von Erfahrungen bezüglich der Blüte von Obstbäumen ausgehend, wurden die Temperaturen und die Sonnenscheindauer von verschiedenen Perioden, welche der winterlichen Sonnenwende vorausgehen, mit dem Austriebsdatum unserer Waldbäume verglichen. Dies geschah sowohl ab dem 1. Januar als auch nach der Schneeschmelze des nachfolgenden Jahres. Man fand auch hier keine statistischen Zusammenhänge. Wie in anderen Untersuchungen in der Agrarmeteorologie wurden die Temperatursummen verbunden mit Sonnenscheindauer, Niederschlagsmengen, oder beide zusammen in Betracht gezogen,

und zwar wurde jeder Parameter separat gewichtet. Der Erfolg blieb aber auch hier aus. Alle oben angegebenen Berechnungen wurden für drei Stationen zwischen 570 und 1560 m ü. M. durchgeführt. Die Resultate der zweiten Berechnungsreihe erlauben es jedoch, vorläufige Kurven des Verlaufes der zwei Parameter mit der Höhe zu zeichnen. Diese Kurven wurden dann anhand von Daten aus drei weiteren dazwischen liegenden Stationen verfeinert. Man erhält somit einen mittleren Wert, um den Austrieb unserer zwei Baumarten zu berechnen, wenn phänologische Direktbeobachtungen fehlen. Diese Methode ist jedoch, wenigstens vorläufig, nur auf der Nordseite der Schweizer Alpen anwendbar.

Summary

Application of Meteorological Models for the Calculation of the Beginning of Two Phenological Phases

Many years ago, a model was elaborated to calculate the «beginning of the vegetation's period», based on temperatures only (7 days with +5 °C temperature or more). The results were correlated with phenological data: the beginning of shoots with regard to spruce and larch. The results were not satisfying, therefore, the value of the two parameters of the first model were modified without changing the second one. The result, however, was again not satisfying. Research then focused on the influence of cumulated temperatures over thermal thresholds. Nevertheless, the results were still not satisfying. The blossoming of fruit trees is influenced by the mean temperature of a given period before the winter solstice. Based on this knowledge, the study evaluated whether forest trees could also be influenced by temperature or sunshine duration of a given period in the rear autumn. The investigation was carried through from the first of January on as well as from the date of snow melt of the following year. In agricultural meteorology, the temperature sums are often interrelated with the sunshine duration, precipitation or both. However, the results were disappointing. All these calculations were made for three stations situated between 570 and 1560 m above sea-level. This allowed to draw curves of variation of the two first parameters (number of days and temperature) separately for each species observed. It was finally possible to specify the thus determined curves with data of three other stations situated between the first ones. This allows to calculate the flushing of the two tree species, if direct phenological observation is lacking. This method, however, is only applicable for the northern part of the Swiss Alps.

Bibliographie

- BURGER H. (1935): Einfluss der Herkunft des Samens auf Eigenschaften forstlicher Holzgewächse. IV. Mitteilung: Die Lärche. Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen. 19 (1): 103–136.
- BUYS M.E.L. et KOTZÉ A.V. (1963): Forecasting of Full Bloom. The Deciduous Fruit Grower. 13 (11): 356–360.
- DEFILA C. (1991): Pflanzenphänologie der Schweiz. Dissertation an der Universität Zürich. Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt. 50: 1–236.
- ENGLER A. (1905): Einfluss der Proveniens des Samens auf die Eigenschaften der forstlichen Holzgewächse. Mitteilungen der schweizerischen Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen, Zürich. 8: 81–236.
- GENSLER G.A. (1964): Der Begriff der Vegetationszeit Inaugural-Dissertation an der Universität Zürich.
- GESLIN H. (1944): Etude des lois de croissance d'une plante en fonction des facteurs du climat (température et radiation solaire). Contribution à l'étude du climat du blé. Thèse de Doctorat de la Faculté des Sciences de Paris. 116.
- GESLIN H. (1952): Contribution à l'étude du complexe héliothermique. Annales de l'I.N.R.A. 3: 321–326.
- ITEM H. (1990): Communication personnelle.
- JACQUIOT C. (1950): Contribution à l'étude des facteurs déterminant le cycle d'activité du cambium chez quelques arbres forestiers. Revue Forestière Française. 11.
- PETER-COMTESSE J. (1957): Le comportement du fayard et du chêne au printemps 1957. La Forêt 10 (8): 177–178.
- PETER-COMTESSE J. (1964): Météorologie et croissance printanière. La Forêt 18 (2) 38–41.
- PRIMAULT B. (1953): Contribution à l'étude de l'influence des éléments météorologiques sur l'accroissement des forêts. Thèse de Doctorat présentée à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich. Geophisica pura e applicata 24: 149–206.
- PRIMAULT B. (1954): De l'influence de l'insolation sur la température du cambium des arbres fruitiers. Revue Romande d'Agriculture, de Viticulture et d'Arboriculture 10 (3): 26–28.
- PRIMAULT B. (1969): D'une application pratique des indices biométéorologiques. Agricultural Meteorology 6 (2): 71–96.
- PRIMAULT B. (1970): Essais de prévision de la date de maturité des abricots en Valais. La Recherche Agronomique en Suisse 9 (3/4): 288–306.
- PRIMAULT B. (1972a): Etude méso-climatique du Canton de Vaud en vue de son aménagement régional. Cahier de l'Aménagement, Lausanne. 14: 186 + 35 planches hors texte.
- PRIMAULT B. (1972b): Probabilité de maturation du maïs-grain jusqu'au 15 octobre. ORLA 266. Documents Suisses d'Agrométéorologie, Tänikon. 301.
- PRIMAULT B. (1972c): Probabilité de maturation du maïs-grain jusqu'au 15 octobre. ORLA 280. Documents Suisses d'Agrométéorologie, Tänikon. 302.
- PRIMAULT B. (1978): De la représentation des limites des séries climatologiques. Rapports de Travail de l'Institut Suisse de Météorologie. 78: 7 + 5 fig. + 2 tab.
- PRIMAULT B. (1990): Détermination du début de la période de végétation par l'évolution de la température comparée à deux phases phénologiques ITAM-90. Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt. 48: 381–384.
- PRIMAULT B. (1991): Essai de détermination du début de l'année végétative en partant de phénomènes cosmographiques. Rapports de Travail de l'Institut Suisse de Météorologie. 163: 16 + 7 fig. + 7 tab.
- PRIMAULT B. (1992): Temperature data used to determine a theoretical beginning of forest trees growth in spring. Theoretical and Applied Climatology. 45: 139–143.
- PRIMAULT B. et FANKHAUSER A. (1988): Les trois années de mesures intensives effectuées dans le cadre du programme national de recherches «Dépérissement des forêts et pollution de l'air en Suisse» (PNR14+) sont-elles climatologiquement représentatives? Si non, pourquoi? Rapports de Travail de l'Institut Suisse de Météorologie. 151: 60 + 1 annexe.
- RÉAUMUR R.A. et FERCHAULT de. (1753): Observations du thermomètre faites à Paris pendant l'année 1735, comparées à celles qui ont été faites sous la ligne, à l'Isle de France, à Alger et en quelques-unes de nos Isles de l'Amérique. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Paris. 545–576.
- ROLOFF A. (1986): Morphologie der Entwicklung von *Fagus sylvatica* (Rotbuche) unter besonderer Berücksichtigung möglicherweise neuartiger Veränderungen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Göttingen. 18: 1–177.
- VASSELLA A. et BRÜGGER R. (1997): Phänologie von Waldbäumen. Historische und aktuelle Beobachtungen. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Umwelt-Materialien. 73: 1–149.

Auteur:

BERNARD PRIMAULT, Ing. for. dipl. EPFZ, Dr. sc. tech. Agro-météorologie, Witikonerstrasse 440, 8053 Zurich.