

Adaptation de la méthode de Penman au calcul du rayonnement net à la pépinière de Luceville, Québec
Adaptation of Penman's method to the measurement of net radiation at the tree nursery in Luceville, Québec
Anpassung von Penmans Methode an die Messung von Nettostrahlung in der Baumschule von Luceville, Québec

André P. Plamondon and Jean Stein

Volume 34, Number 1, 1980

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1000387ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/1000387ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (print)

1492-143X (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Plamondon, A. P. & Stein, J. (1980). Adaptation de la méthode de Penman au calcul du rayonnement net à la pépinière de Luceville, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 34(1), 107–114. <https://doi.org/10.7202/1000387ar>

Article abstract

Penman's approach to evaluate potential evaporation is widely used. Since net radiation is not always measured, Penman computes this parameter from coefficients partly determined from experiments in England. From different coefficients used by authors including Penman and Mateer, seven equations based on energy balance are tested. Net radiation is also estimated from meteorological variables using linear regression. Although this latter gives slightly better results, the Mateer adapted equation is preferred because it is more physical and probably more applicable outside the study site.

ADAPTATION DE LA MÉTHODE DE PENMAN AU CALCUL DU RAYONNEMENT NET À LA PÉPINIÈRE DE LUCEVILLE, QUÉBEC

André P. PLAMONDON et Jean STEIN, respectivement professeur et assistant de recherches, Département d'aménagement et de sylviculture, Université Laval, Sainte-Foy, Québec G1K 7P4.

RÉSUMÉ La méthode de Penman, qui permet de calculer l'évaporation potentielle, est internationalement reconnue. Le rayonnement net n'étant pas toujours mesuré, Penman a été en mesure de calculer ce paramètre à l'aide d'une équation basée sur le bilan radiatif, dont les coefficients ont partiellement été déterminés à partir de données expérimentales recueillies en Angleterre. À partir des coefficients rapportés par divers auteurs, dont Penman et Mateer, nous avons analysé sept équations basées sur le bilan radiatif. Le rayonnement net a aussi été calculé en effectuant une régression linéaire à partir des variables météorologiques standard. Cette deuxième approche améliore quelque peu les résultats, mais nous avons tout de même retenu l'équation de Mateer adaptée, car celle-ci est basée sur des principes physiques qui la rendent plus applicable en dehors du site à l'étude.

ABSTRACT *Adaptation of Penman's method to the measurement of net radiation at the tree nursery in Luceville, Québec.* Penman's approach to evaluate potential evaporation is widely used. Since net radiation is not always measured, Penman computes this parameter from coefficients partly determined from experiments in England. From different coefficients used by authors including Penman and Mateer, seven equations based on energy balance are tested. Net radiation is also estimated from meteorological variables using linear regression. Although this latter gives slightly better results, the Mateer adapted equation is preferred because it is more physical and probably more applicable outside the study site.

ZUSAMMENFASSUNG *Anpassung von Penmans Methode an die Messung von Nettostrahlung in der Baumschule von Luceville, Québec.* Die Methode Penmans zur Messung der potentiellen Verdunstung ist international bekannt. Da die Nettostrahlung nicht immer gemessen wird, hat Penman es ermöglicht diesen Parameter mit Hilfe einer Gleichung, die sich auf den Strahlungsbilan stützt, und deren Koeffizienten teilweise durch in England gesammelte, experimentale Daten festgesetzt wurden. Von verschiedenen Koeffizienten, die von Autoren einschliesslich Penmans und Mateer benutzt wurden, hat man sieben, auf Energiegleichgewicht gegründete Gleichungen getestet. Die Nettostrahlung wurde auch, durch meteorologische Varianten unter Benutzung der linearen Regression berechnet. Diese zweite Methode verbesserte die Resultate ein wenig, aber wir haben trotzdem die angepasste Gleichung von Mateer beibehalten, weil sie auf physischen Prinzipien beruht, die sie ausserhalb des Studiengebietes besser verwendbar machen.

LISTE DES SYMBOLES UTILISÉS

SYMBOLE	DESCRIPTION	UNITÉS
		R_{Lu}
		Rayonnement de grande longueur d'onde dirigé vers le ciel et venant du sol
		$ly\ j^{-1}$
		Se
		Erreur type résiduelle de la régression
		$ly\ j^{-1}$
b_i où $i = 1, 2 \dots$	Coefficient de régression ou constante empirique	Sx'
c	Coefficient montrant l'effet des nuages sur la radiation	Coefficient de variation = $\frac{Sx_i \text{ ou } Se \text{ ou } Se}{x_i \quad x_i \quad S_{b_i}}$
e_a	Pression de vapeur actuelle de l'air	T (test)
e_s	Pression de vapeur saturante de l'air à T_a	Test du T; sert à vérifier la validité des coefficients d'une régression linéaire
E	Évaporation à partir d'une surface d'eau libre	mb
E_a	Évaporation à partir d'une surface d'eau libre qui aurait la température de l'air	mb
F (test)	Test du F; sert à vérifier la validité de la régression linéaire	T_a
K	Paramètre déterminé à partir d'observations.	u_2
l	Couverture nuageuse exprimée en fraction décimale de la surface du ciel	Vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol (pour les constantes de l'équation 2)
n	Nombre d'heures réelles d'ensoleillement journalier	v
	$\bar{n} = 1 - \frac{1 - l + n/N}{2}$	Paramètre déterminé à partir d'observations
n/N	Rapport d'ensoleillement	\bar{x}_i
N	Nombre d'heures possibles d'ensoleillement journalier	Moyenne arithmétique de la variable x_i
r	Albédo	z
R	Coefficient de corrélation total	Paramètre déterminé à partir d'observations
R^2	Coefficient de détermination total. Pourcentage de la régression expliquée par la ou les variables explicatives.	ϵ
R_a	Rayonnement extra-terrestre reçu sur une surface horizontale	Δ
R_b	Rayonnement net de grandes longueurs d'onde émis à partir de la surface du sol; $R_b = RLd - R_{Lu}$	Pente de la courbe de la fonction donnant la pression de vapeur saturante en fonction de la température de l'air
R_b'	Rayonnement net de grandes longueurs d'onde émis à partir de la surface du sol par ciel clair	$mm\ Hg^\circ C^{-1}$
R_n	Rayonnement net	γ
R_o	Insolation ou rayonnement incident sur une surface horizontale de la Terre dans des conditions atmosphériques moyennes sous un ciel dégagé	Constante de l'équation de Penman permettant d'avoir des unités consistantes
R_r	Rayonnement réfléchi de courtes longueurs d'onde	$mm\ Hg^\circ C^{-1}$
R_s	Rayonnement incident de courtes longueurs d'onde	σ
R_{Ld}	Rayonnement de grandes longueurs d'onde dirigé vers le sol et venant de l'atmosphère	Constante de Stephan — Boltzmann ($1,17 \times 10^{-7}$)
		$ly\ j^{-1} K^{-4}$

INTRODUCTION

Il est important de connaître la quantité d'eau perdue par évaporation lorsque l'on veut optimiser le rendement d'un système d'irrigation. L'évaporation est un processus naturel qui nécessite de l'énergie. Il n'est toutefois pas nécessaire de tenir compte de toutes les formes d'énergie qui l'affecte, car elles découlent en majeure partie de l'énergie solaire transmise par rayonnement. Ainsi, l'évaporation peut être estimée si l'on connaît la quantité d'énergie qui est disponible au sol sous forme de rayonnement et les processus aérodynamiques qui dissipent la vapeur d'eau dans l'air. C'est d'ailleurs en suivant cette approche que PENMAN élabore sa méthode en 1948.

Dans notre étude, nous adaptons les équations de PENMAN (1948) et de MATEER (1955b) aux conditions prévalant à la pépinière de Luceville, en modifiant certains coefficients du calcul du rayonnement net de grandes ou de courtes longueurs d'onde. Nous analysons ensuite un certain nombre de régressions linéaires basées sur des variables météorologiques afin de vérifier si elles donnent de meilleurs résultats que des équations plus physiques, comme celles de Penman.

LE SITE EXPÉRIMENTAL, L'INSTRUMENTATION ET LA MÉTHODE

L'expérience a eu lieu à la pépinière du ministère des Terres et Forêts à Luceville, située à 320 km au nord-est de Québec et à 3 km au sud du Saint-Laurent (fig. 1). La pépinière couvre environ une quarantaine d'hectares de sable loameux dérivant de plages marines. Les données ont été recueillies, dans le secteur expérimental, du 14 mai au 23 septembre 1975. On y retrouve des plates-bandes de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) 1 + 0 et d'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench) Voss.) 1 + 0.

Le rayonnement net a été mesuré à l'aide d'un bilanmètre avec dôme de polyéthylène (FUNK, 1959; Swissteco, type S-1) installé à 50 cm au-dessus d'une plate-bande. Une pompe à aquarium et un cylindre de gel de silice ont été utilisés pour purger les boucliers de polyéthylène avec de l'air sec. Au début de la période à l'étude, le signal du capteur a été intégré sur une base continue (BLACK *et al.*, 1974) et imprimé à toutes les 30 minutes à l'aide d'un synchroniseur et d'un compteur d'impulsions imprimeur (Sodeco, PL103). Plus tard, à cause d'un problème technique, le signal a été enregistré par un potentiomètre enregistreur (Easterline-Angus, modèle T171B), et le rayonnement net (Rn) a été calculé manuellement.

Les données météorologiques standard provenaient de trois endroits. Les données sur les précipitations et les températures maximale et minimale journalières ont été mesurées à une station météorologique située à environ 1 km du site expérimental. La vitesse du vent, la pression de vapeur d'eau et la durée de l'ensoleillement ont été obtenues à la station de l'aéroport de Mont-Joli, situé à 10 km à l'est du site et à une altitude approximativement identique. Les données de rayonnement incident (R_s) provenaient de Rimouski situé plus près du Saint-Laurent (fig. 1). Dans ce dernier cas, à cause de la proximité du fleuve, nous avons observé des différences d'ennuageage par rapport aux deux autres endroits.

THÉORIE

PENMAN (1948) découvre une équation qui permet de calculer l'évaporation au-dessus d'une surface d'eau libre à partir du vent et du rayonnement.

$$E = (\Delta R_n + \gamma E_a) / (\Delta + \gamma) \quad (1)$$

Cette équation comprend deux parties principales. Une première partie tient compte de l'énergie transportée aérodynamiquement et est donnée par E_a:

$$E_a = 0,35 (e_s - e_a) (1,0 + 0,01u_2) \quad (2)$$

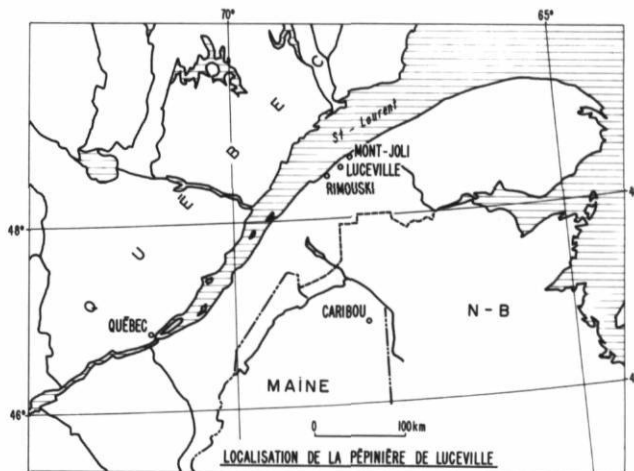


FIGURE 1. Localisation de la pépinière de Luceville. Location map of the Luceville tree nursery.

Les constantes sont déterminées empiriquement. L'autre partie est basée sur le bilan radiatif ou rayonnement net. Le bilan radiatif est une équation physique qui permet de calculer la quantité de rayonnement disponible pour un milieu donné, et il est égal au rayonnement émis par le soleil et l'atmosphère vers la terre, moins le rayonnement émis et réfléchi par le sol vers le ciel. D'où :

$$R_n = R_s - R_r + R_{La} - R_{Lu} \quad (3)$$

$$= [(1 - r) R_s] + R_b \quad (4)$$

Une partie de l'énergie solaire sert donc à évaporer l'eau qui est elle-même transportée par les mouvements turbulents de l'air. Le rayonnement net peut se mesurer directement à l'aide d'un bilanmètre. Toutefois, celui-ci n'est pas toujours pratique, car il est coûteux, fragile, et demande une bonne formation technique de la part de l'utilisateur. Il s'avère alors parfois nécessaire d'estimer le rayonnement net à partir de facteurs connus qui l'influencent et qu'on peut facilement obtenir, comme la température de l'air et du sol, la durée d'ensoleillement, le rayonnement global, la pression de vapeur d'eau dans l'air, l'albédo de la surface, etc. Ces facteurs influencent le rayonnement des grandes et des courtes longueurs d'onde, qui sont les deux composantes du rayonnement net. Celui-ci peut aussi être déterminé empiriquement à l'aide d'équations de régression.

Le rayonnement de courtes longueurs d'onde peut être calculé au moyen de l'équation suivante :

$$\frac{R_s}{R_a} = b_0 + b_1 \frac{n}{N} \quad (5)$$

Cette équation, proposée par ANGSTRÖM (1924), démontre que la quantité de rayonnement incident atteignant une surface est fonction du rayonnement extra-

terrestre et de la quantité de nuages dans le ciel. Cette régression (5) varie en fonction du lieu et de la période du jour et de l'année. Ces facteurs influencent l'intensité et la longueur d'onde du rayonnement. Les coefficients b_0 et b_1 varient donc selon l'absorption, la réflexion, la diffusion de l'air et l'appareil utilisé pour mesurer le rayonnement incident. Penman calcule, à Rothamsted, $b_0 = 0,18$ et $b_1 = 0,55$, comme coefficients pour des valeurs mensuelles enregistrées de 1931 à 1940, mais il ne donne pas de coefficient de corrélation.

En ce qui a trait au rayonnement de grandes longueurs d'onde, la régression s'exprime de la façon suivante :

$$\frac{R_{Ld}}{R_{Lu}} = b_0 + b_1 \sqrt{e_a} \quad (6)$$

Cette équation, proposée par BRUNT (1932), stipule que R_{Ld} est fonction de R_{Lu} et de la quantité de vapeur d'eau dans l'air. R_{Lu} est égal à $\epsilon\sigma T_s^4$; on suppose ici que l'émissivité du sol est celle d'un corps noir (GEIGER, 1966, p. 12). Habituellement les chercheurs mesurent la température de l'air sous abri à 1 ou 2 m au-dessus du sol au lieu de la prendre à sa surface, en supposant que les deux sont approximativement égales. Toutefois, SELLERS (1965) note que si la différence de température excède 10°C entre le niveau de 1 m et la surface du sol, le facteur de correction que l'on devrait alors appliquer au rayonnement émis calculé à partir de la température à 1 m peut être sous-estimé par un facteur de 2. On a donc avantage à mesurer la température le plus près possible du sol. Quelle que soit la forme choisie, les équations empiriques permettant de trouver le rayonnement net de grandes longueurs d'onde, à partir de la surface du sol (R_b), donnent le plus souvent de très bons résultats pour des valeurs journalières (SELLERS, 1965). Les coefficients de corrélation simple cités par BRUNT (1939) varient entre 0,73 et 1,0 pour une moyenne de 0,92.

Penman utilise 0,44 pour b_0 et 0,092 pour b_1 , les constantes empiriques étant basées sur les valeurs moyennes des coefficients obtenus pour six régressions citées par BRUNT (1939).

Puisque R_b ($R_b = R_{Ld} - R_{Lu}$) a été calculé pour des journées ensoleillées, on doit donc multiplier ces termes par un facteur qui tienne compte de l'enneigement: $(1 - 0,09\ell)$. Ce facteur a été proposé par ANGSTROM en 1916. À la suite de quelques observations faites sur ce phénomène, il remarque qu'en moyenne, lorsque le ciel est complètement couvert, le rayonnement égale un dixième du rayonnement perdu par ciel clair. Ainsi pour :

$$R_b' = (1 - 0,09\ell) R_b \quad (7)$$

Penman arrondit à :

$$R_b' = (1 - 0,1\ell) R_b \quad (8)$$

probablement parce que ce coefficient est suffisamment précis par rapport aux autres termes de l'équation. La valeur de ℓ est généralement observée deux fois par jour; Penman remplace donc $\ell/10$ par $1 - n/N$ qui a l'avantage de pouvoir être enregistré tout au long de la journée. Après quelques transformations arithmétiques, il obtient :

$$R_b' = 0,10 + (0,90n/N) R_b \quad (9)$$

qui a la forme suivante :

$$R_b' = (z + (1 - z) n/N) R_b \quad (10)$$

Le terme z prend plusieurs valeurs selon les auteurs: 0,10 (PENMAN, 1948), 0,20 (KRAMER, 1957), 0,24 (IMPENS, 1963) et 0,30 (FITZPATRICK et STEIN, 1965), tels que cités par LINACRE (1968); ce dernier adopte comme compromis un z égal à 0,20. Toutefois, ce facteur n'est qu'approximatif car il ne tient pas compte de la hauteur et de la forme des nuages qui affectent beaucoup la relation. ASKLÖF (1920), cité par BRUNT (1939), estime que la perte nette de chaleur du sol sous un ciel entièrement couvert de nuages élevés (cirro-stratus à 6,4 km) est presque aussi grande que sous un ciel clair (0,135 contre 0,169); lorsque le ciel est couvert de nuages bas et épais, cette perte est égale à environ 1/7 de celle enregistrée sous un ciel clair (0,023 contre 0,169). Parmi les découvertes les plus récentes, SAVINOV et GALPERIN (1949), cités par BUDYKO (1956), proposent une nouvelle relation, laquelle donnerait de meilleurs résultats :

$$R_b' = R_b (1 - c\bar{n}) \quad (11)$$

Plus récemment encore, BUDYKO (1956) rapporte une autre relation qui, cette fois, tient compte de la hauteur des nuages :

$$R_b' = R_b (1 - Kn^v) \quad (12)$$

L'équation n° 12 serait théoriquement meilleure que la précédente. Le coefficient K varie en fonction de la hauteur des nuages; habituellement $v = 1$, mais devrait plutôt se situer entre 1,5 et 1,7 d'après SELLERS (1965). Cette relation ne peut toutefois pas être utilisée à Luceville, car la hauteur des nuages n'y est pas observée.

Si tous ces termes sont remplacés dans l'équation de départ (3), on obtient :

$$R_n = (1 - r) R_a (b_0 + b_1 n/N) - \sigma T_a^4 (1 - b_0 - b_1 \sqrt{e_a}) \quad (0,56 + 0,09 n/N) \quad (13)$$

Et si les coefficients trouvés par Penman sont introduits dans l'équation n° 13, on obtient l'équation suivante :

$$R_n = (1 - r) R_a (0,18 + 0,55n/N) - \sigma T_a^4 (0,56 - 0,09 \sqrt{e_a}) \quad (0,56 - 0,09) \quad (14)$$

MATEER (1955a) présente des schémas exprimant l'insolation moyenne, sous un ciel clair, le 15^e jour de chaque mois. Ses valeurs sont basées sur des données observées à Caribou, situé à 200 km au sud de Luceville; ses données reposent sur des observations réparties sur un certain nombre de mois choisis au cours d'une période moyenne de trois ans. Pour calculer la valeur de R_s , Mateer utilise R_o de préférence à R_a . Il calcule le rapport R_s/R_o pour chaque mois et obtient pour l'été la régression suivante:

$$\frac{R_s}{R_o} = (0,355 + 0,68n/N) \quad (15)$$

Le coefficient de corrélation est égal à $0,355 + 0,68n/N$ 0,93 et l'erreur type résiduelle 0,029. L'erreur du R est d'environ 5 à 10% pour des valeurs mensuelles et elle est sûrement plus grande pour des valeurs journalières.

Dans le *Manuel des principes d'hydrologie* (GRAY, 1972), on indique l'équation de Mateer de la façon suivante:

$$R_n = (1 - r) R_o (0,355 + 0,68n/N) - \sigma T_a^4 (0,56 - 0,09 \sqrt{e_a}) (0,10 + 0,9n/N) \quad (16)$$

On pourrait croire que MATEER (1955) a vérifié et adapté l'équation de PENMAN (1948) aux conditions canadiennes, mais cette impression est vite dissipée à la lumière des deux publications citées comme référence dans le même ouvrage (MATEE, 1955a et b). L'équation pourrait tout de même très bien s'appliquer, et c'est pourquoi nous l'avons vérifiée à Luceville. Étant donné que R_o est calculé le 15^e jour de chaque mois, une valeur doit être établie pour chaque jour par interpolation. Les valeurs obtenues sont basées sur le taux d'augmentation de R_a journalier. Par exemple, si R_a augmente de 1% par rapport à la journée précédente, la même augmentation, exprimée en pourcentage, est ajoutée à R_o . Nous avons aussi utilisé différentes équations de régression, ayant comme variable dépendante le rayonnement net et comme variables indépendantes des facteurs météorologiques. Les coefficients de l'équation de Penman ayant en partie été calculés en Angleterre et appliqués partout dans le monde, nous avons cherché des coefficients plus spécifiques à la pépinière de Luceville. Les équations permettant le calcul du rayonnement net avec de nouveaux coefficients sont appelées ci-après: équation de Penman adaptée et équation de Mateer adaptée.

Les meilleures équations de régression, celles de Penman, de Mateer, de Penman adaptée et de Mateer adaptée sont ensuite comparées avec le rayonnement net mesuré. Il est à noter que dans cette étude, nous utilisons le rayonnement net positif, le rayonnement net négatif durant la nuit n'ayant pu être mesuré durant toute la période.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. ADAPTATION DE L'ÉQUATION DE PENMAN

PENMAN (1948) utilise donc deux équations pour calculer le rayonnement net: l'une pour le rayonnement solaire, l'autre pour le rayonnement atmosphérique et terrestre. Pour le rayonnement solaire, nous obtenons à Luceville les coefficients $b_o = 0,152$ et $b_1 = 0,428$; ce sont des valeurs qui concordent assez bien avec celles de Penman où $b_o = 0,18$ et $b_1 = 0,55$. L'équation (5) devient donc:

$$\frac{R_s}{R_a} = 0,152 + 0,428 \frac{n}{N} \quad (17)$$

Toutes les hypothèses de la méthode des moindres carrés sont également vérifiées, à l'exception de l'auto-corrélation entre les erreurs qui est légèrement positive suivant le calcul du coefficient de corrélation sériale entre les résidus successifs. La variation n/N est en mesure d'expliquer 82% de la variation R_s/R_a ; l'erreur type résiduelle égale 0,63 et les tests T et F sont significatifs au seuil de 1%. L'équation devrait donc donner de bons résultats même si l'échantillonnage est assez restreint, puisque le rapport $S_x' = S_e/\bar{x}$ est égal à 17% et représente une erreur qui paraît acceptable pour les besoins de la pépinière. PYNDIC (1976), considérant le domaine économique, rapporte qu'une équation peut aussi servir à faire de la prédiction lorsque ce rapport se situe aux environs de 15%.

En ce qui a trait au bilan des grandes longueurs d'onde, R_{Ld} n'étant pas mesuré à Luceville, nous ne pouvons utiliser une équation qui aurait des coefficients propres à ce site. Même si nous utilisons une autre équation empirique pour évaluer R_{Ld} , par exemple celle de ANGSTRÖM (1916) où:

$$\frac{R_{Ld}}{R_{Lu}} = b_o - b_1 10^{-b_2 e} \quad (18)$$

les constantes empiriques obtenues dans l'équation n° 6 à l'aide du R_{Ld} calculé ne seraient pas réellement propres à Luceville. De plus, SELLERS (1965), à la suite d'un examen de l'étude d'ABRAHAM (1960), estime que le pourcentage d'erreur des mesures du rayonnement des grandes longueurs d'onde sous un ciel clair est d'environ 20%. Il ne semble donc pas nécessaire de trouver des coefficients qui soient propres à Luceville. Toutefois, puisque Penman se base sur les valeurs trouvées dans six études et qu'on en a ajouté d'autres depuis, nous avons décidé d'utiliser la médiane de 22 évaluations, d'où $b_o = 0,605$ et $b_1 = 0,048$ (SELLERS, 1965). Le facteur d'ennuagement tel qu'utilisé par Penman n'est pas changé. Nous obtenons donc l'équation suivante (tabl. I):

$$R_n = (1 - r) R_a (0,152 + 0,428n/N) - \sigma T_a^4 (0,395 - 0,048 \sqrt{e_a}) (0,1 + 0,9n/N) \quad (19)$$

TABLEAU I

Les équations du rayonnement net calculé

Équation de Penman avec Rs calculé	$Rn_1 = 0,85R_a (0,18 + 0,55n/N) - \sigma T_a^4 (0,56 - 0,09\sqrt{e_a}) (0,1 + 0,9n/N)$	(14)
Équation de Mateer	$Rn_2 = 0,85R_o (0,355 + 0,68n/N) - \sigma T_a^4 (0,56 - 0,09\sqrt{e_a}) (0,1 + 0,9n/N)$	(16)
Équation de de Penman adaptée (1)	$Rn_3 = 0,85R_a (0,152 + 0,428n/N) - \sigma T_a^4 (0,395 - 0,048\sqrt{e_a}) (0,1 + 0,9n/N)$	(19)
Équation de régression	$Rn_4 = -514 + 15,83n + 45,97N$	(20)
Équation de régression	$Rn_5 = -144,9 - 0,025\sigma T_a^4 \sqrt{e_a} n/N + 0,362R_a + 0,348R_a n/N$	(21)
Équation de Penman avec Rs mesuré	$Rn_6 = 0,85R_s - \sigma T_a^4 (0,56 - 0,09\sqrt{e_a}) (0,1 + 0,9n/N)$	(30)
Équation de Penman adaptée (2)	$Rn_7 = 0,85R_a (0,152 + 0,428n/N) - \sigma T_a^4 (0,56 - 0,09\sqrt{e_a}) (0,1 + 0,9n/N)$	(31)
Équation de Penman adaptée (3)	$Rn_8 = 0,85R_a (0,152 + 0,428n/N) - \sigma T_a^4 (0,395 - 0,048\sqrt{e_a}) (0,2 + 0,8n/N)$	(32)
Équation de Mateer adaptée	$Rn_9 = 0,85R_o (0,355 + 0,68n/N) - \sigma T_a^4 (0,395 - 0,048\sqrt{e_a}) (0,2 + 0,8n/N)$	(33)

2. ÉQUATIONS DE RÉGRESSION

Nous avons analysé plusieurs équations de régression linéaire reliant la variable dépendante R_n avec des données météorologiques (tabl. I). Les équations nos 20 et 21

$$R_n = -514 + 15,83n + 45,97N \quad (20)$$

$$R_n = -144,9 - 0,025\sigma T_a^4 \sqrt{e_a} n/N + 0,362 R_a + 0,348 R_a n/N \quad (21)$$

donnent un coefficient de détermination multiple, un pouvoir de prévision et une erreur type résiduelle et significative au seuil de probabilité de 1%. La valeur de ces équations est donc semblable à celle des autres équations. Le test de Durbin-Watson appliqué à ces deux équations ne donne qu'une indétermination en ce qui a trait à l'autocorrélation; elle sera donc faible, si elle existe. De plus, il n'y a pas d'hétéroscédasticité entre la variable dépendante calculée et les erreurs. Si nous laissons de côté la constante de Stephan-Boltzmann, l'équation n° 21, même si elle ne possède que trois variables explicatives, requiert l'observation et le calcul de cinq variables. L'équation n° 20 ne requiert que deux variables. Nous retenons donc ces deux équations à cause du nombre restreint de variables explicatives nécessaires et de l'erreur type résiduelle faible. Néanmoins, l'équation n° 21 possède de plus l'avantage d'être plus physique et pourrait éventuellement être appliquée ailleurs.

L'équation de Penman décomposée en une équation de régression linéaire est aussi testée. Toutefois, elle ne fournit pas beaucoup plus d'informations que les deux équations choisies (20 et 21). Elle offre de plus le désavantage de demander beaucoup de calculs et la présence de huit variables explicatives.

L'équation de régression de la forme

$$R_n = b_0 + b_1 R_s \quad (22)$$

est employée par beaucoup d'auteurs. FRITSCHEN (1967), pour sa part, a obtenu

$$R_n = -0,12 + 0,73R_s \quad (23)$$

Les données qui ont servi au calcul de l'équation n° 23 ont été recueillies sous climat aride (Arizona) de janvier à septembre, deux fois la semaine et toujours par beau temps. Dans cette équation, la radiation est considérée comme étant la radiation totale journalière (convertie en ly/min) calculée à partir des données de radiation prises à toutes les 15 minutes. Il s'agit d'une régression moyenne pour les cultures céréalières dont l'erreur type résiduelle est égale à 0,057 et dont le coefficient de détermination multiple est égal à 0,995. Une dizaine d'auteurs, de presque toutes les parties du monde (DAVIES, 1967; LINACRE, 1968), ont utilisé l'équation n° 22 et ont obtenu des coefficients de corrélation très élevés, de l'ordre de 0,90 à 0,99, alors que celui qui a été obtenu à Luceville n'est que de 0,74. Leur période d'observation était pourtant à peu près égale à la nôtre. Cette différence de degré de la linéarité dépend probablement de la distance entre les points de mesure de R_s et R_n dans notre étude. Elle peut aussi être due à une variation de la hauteur, de la densité et de la couverture des plants (DAVIES, 1967).

3. COMPARAISON DU RAYONNEMENT NET MESURÉ ET DU RAYONNEMENT NET CALCULÉ

Nous avons retenu deux équations de régression (20 et 21) et sept équations basées sur le bilan radiatif. Les sept équations basées sur le bilan radiatif comprennent l'équation de Penman, de Penman adaptée, de Mateer adaptée, etc. Pour choisir la meilleure équation, les rayonnements nets positifs, calculés à l'aide des neuf équations du tableau I, sont comparés avec le rayonnement net mesuré.

L'albédo est estimé comme étant égal à 15%, car, dans le cas qui nous intéresse ici, les conifères croissent sur un sable loameux mêlé de matière organique où ils occupent 10% de la superficie. Il est à noter que dans ces équations e_a est exprimé en mm de Hg excepté dans la quatrième et la cinquième où il l'est en millibar. Les différentes statistiques sont inscrites au tableau II.

TABLEAU II

Résultats des neuf régressions effectuées
entre le rayonnement net mesuré et le rayonnement net calculé

Équation	Coefficient b_0	Coefficient b_1	R	R ²	Erreur type résiduelle
Rn ₁	45,60	0,97	0,83	0,70	62,34
Rn ₂	-13,64	0,93	0,86	0,74	57,86
Rn ₃	21,71	1,48	0,86	0,74	57,71
Rn ₄	- 0,04	1,00	0,89	0,80	51,21
Rn ₅	- 0,05	1,00	0,89	0,80	51,05
Rn ₆	80,53	1,16	0,69	0,47	82,15
Rn ₇	51,44	1,31	0,81	0,65	67,23
Rn ₈	47,09	1,39	0,86	0,74	57,49
Rn ₉	- 9,01	0,93	0,88	0,78	53,15

L'examen des relations Rn₁ à Rn₉ révèle que les équations basées sur le bilan radiatif donnent des coefficients de corrélation plus faibles (0,82) que les deux équations de régression (0,89). Ce résultat est dû en partie au fait que l'albédo n'est pas mesuré, mais estimé; de plus, il s'agit d'équations dont les coefficients ont en partie été trouvés dans d'autres sites. À Luceville, l'équation de Penman donne de meilleurs résultats lorsqu'on emploie le rayonnement de courtes longueurs d'onde calculé (Rn₁) au lieu du rayonnement de courtes longueurs d'onde mesuré (Rn₆). Si cette constatation semble être un non-sens de prime abord, après un examen plus approfondi, on s'aperçoit cependant, que pour obtenir Rn₆, R_s est mesuré à Rimouski et que n/N est mesuré, lui, à Mont-Joli. Le rayonnement incident de courtes longueurs d'onde mesuré à Rimouski serait donc moins relié linéairement au rayonnement net que le rayonnement incident calculé à l'aide du rapport d'ensoleillement mesuré à Mont-Joli. Le coefficient de corrélation simple de Rn₁ (Angleterre) est égal à 0,83, alors que celui du Rn₇ (Luceville) est de 0,81 avec une erreur type résiduelle plus grande. On se serait attendu à l'inverse, car Rn₇ est déterminé à partir de conditions météorologiques prévalant à Luceville. Le résultat obtenu dépend peut-être aussi du nombre de données ayant servi au calcul de la régression. Toutefois, lorsqu'on modifie le bilan des grandes longueurs d'onde avec les changements apportés par BUDYKO (1956) et LINACRE (1968), le coefficient de corrélation simple augmente à 0,86 (Rn₈). L'équation de Mateer (Rn₂) donne un meilleur résultat que l'équation de Penman si on compare les coefficients de corrélation et l'erreur type résiduelle. Cela laisse donc supposer que si on employait un albédo mesuré au lieu d'un albédo estimé ainsi que les changements apportés par BUDYKO (1956) et LINACRE (1968), on pourrait peut-être obtenir un coefficient de corrélation supérieur à 0,89. C'est d'ailleurs ce que nous avons fait, et le coef-

ficient obtenu est de 0,88; l'albédo reste cependant une estimation.

Pour choisir la meilleure équation, nous avons basé notre choix sur l'erreur type résiduelle, le coefficient de détermination total, la pente et le point d'interception avec l'axe des y. Les équations Rn₁, Rn₃, Rn₆, Rn₇ et Rn₈ ont été éliminées, car leur erreur type résiduelle, leur pente ou leur point d'interception avec l'ordonnée sont trop élevés. L'équation Rn₂ a aussi été écartée à cause de son erreur type résiduelle. Les équations Rn₄, Rn₅ et Rn₉ sont donc celles qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats à Luceville. Malgré le point d'interception, la pente légèrement plus faible et l'erreur type résiduelle plus grande que les deux équations précédentes, la neuvième équation a finalement été retenue car elle est basée sur le bilan radiatif. Étant ainsi plus physique, elle possède en outre le net avantage d'être applicable ailleurs.

La figure 2 exprime le rayonnement net calculé (Rn₉) en fonction du rayonnement net mesuré. Elle montre que la relation surestime le rayonnement net mais aussi qu'elle est la plus adéquate des relations semi-empiriques testées en considérant toutefois que R_s n'est pas mesuré au site expérimental.

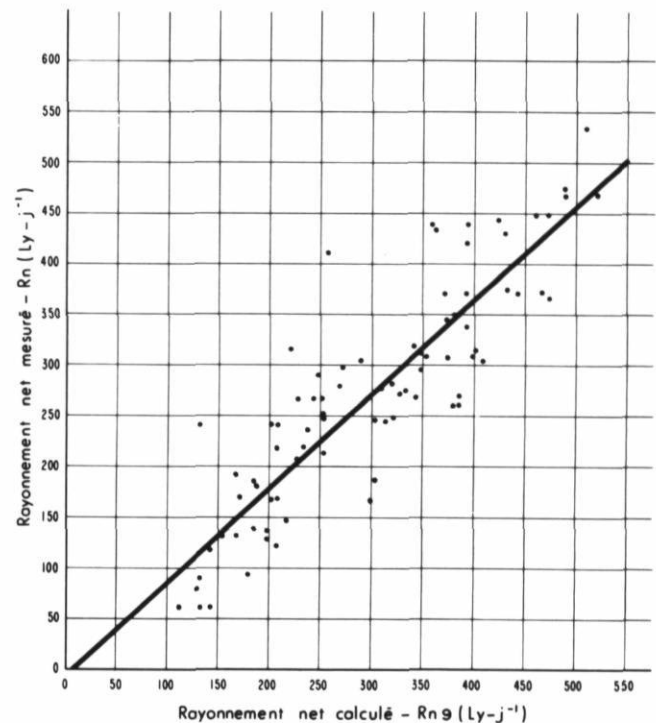


FIGURE 2. Le rayonnement net mesuré mis en relation avec le rayonnement net calculé selon l'équation de Mateer adaptée.
Measured net radiation plotted with calculated net radiation according to the adapted equation from Mateer.

CONCLUSION

Cette étude montre que l'utilisation de l'équation de Mateer adaptée améliore nettement le calcul du rayonnement net par rapport à la méthode de Penman. Toutefois, cette équation devrait être utilisée dans d'autres conditions afin d'en vérifier la généralisation. De plus, comme le facteur d'ennuage choisi représente un compromis entre les valeurs obtenues par quatre auteurs, l'équation pourrait sûrement être améliorée en l'adaptant à nos conditions régionales.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été subventionnée par le Service de la restauration du ministère des Terres et Forêts et le Conseil national de la recherche du Canada. Les auteurs remercient le personnel de la pépinière de Luceville et les dessinateurs du laboratoire de cartographie de la faculté de Foresterie et de Géodésie pour leur collaboration.

BIBLIOGRAPHIE

- ANGSTRÖM, A. (1916): On the radiation and temperature of snow and the convection of the air at its surface, *Arkiv für Matematik, Astronomi och Fysik*, 13, N: 021: 1-18.
- (1924): Solar and terrestrial radiation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 50: 121.
- BLACK, T. A., TANG, P. A., TAN, C. S., CURTIS, J. R. et McNAUGHTON, K. G. (1974): *Measurement techniques used in forest hydrometeorology. Final report for the director*, Pacific forest research center, Dept. of the environment, Victoria, B. C., 78 p.
- BRUNT, D. (1932): Notes on radiation in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 58: 389-420.
- (1939): *Physical and dynamical meteorology*, Cambridge Univ. Press: 124-146.
- BUDYKO, M. I. (1956): *Teplovoi Balans Zemnoi Poverkhnosti. Gidrometeorologi cheskoe Izdatel'stvo*, Leningrad (trad. anglaise: Stepanova, N. A., 1958, The heat balance of the earth's surface, Office of Technical Services, U.S. Dept. of Commerce, Washington), 257 p.
- DAVIES, J. A. (1967): A note on the relationship between net radiation and solar radiation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 93: 109-115.
- FRITSCHEN, L. J. (1967): Net and solar-radiation relations over irrigated field crops, *Agr. Meteorol.*, 4: 55-62.
- FUNK, J. P. (1959): Improved polyethylene-shielded net radiometer, *J. Sci. Instr.*, 36: 367-370.
- GEIGER, R. (1966): *The climate near the ground*, Harvard Univ. Press, 611 p.
- GRAY, D. M., édit. (1972): *Manuel des principes d'hydrologie*, Conseil national de recherches du Canada, 600 p.
- LINACRE, E. T. (1968): Estimating the net radiation flux, *Agric. Meteorol.*, 5: 49-63.
- MATEER, C. L. (1955a): Average insolation in Canada during cloudless days, *Can. J. Tech.*, 33: 12-32.
- (1955b): A preliminary estimate of average insolation in Canada, *Can. J. Tech.*, 35: 579-594.
- PENMAN, H. L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, 193: 120-145.
- PYNDIC, S. R. (1976): *Econometric Models and Economics Forecasts*, McGraw Hill, 576 p.
- SELLERS, D. (1965): *Physical Climatology*, Univ. of Chicago Press, Chicago, 272 p.