

ESTIMATION DE LA TRANSPARENCE DE L'ATMOSPHÈRE PAR CIEL CLAIR À LA STATION SCIENTIFIQUE DES HAUTES-FAGNES (SSHF), MONT RIGI, BELGIQUE. COMPARAISON AVEC LA STATION D'UCCLE-BRUXELLES (IRM)

Marie DURY, Serge GINION et Michel ERPICUM

Résumé

Cet article porte sur l'étude de la transparence de l'atmosphère par ciel clair au Mont Rigi (Hautes-Fagnes belges). Il a pour objectif la mise en évidence des particularités de la composition de l'air de cette région et la quantification de son influence sur le rayonnement solaire global. Nous avons utilisé les données suivantes : hauteur du Soleil, teneur en vapeur d'eau de l'air (caractérisée par la hauteur d'eau condensable) et rayonnement solaire reçu à la limite supérieure de l'atmosphère. En l'absence de données sur les particules en suspension dans l'air à la Station scientifique des Hautes-Fagnes (SSHF), nous avons comparé le rayonnement global reçu par ciel clair à celui enregistré pour de mêmes conditions et les mêmes journées à Uccle (Bruxelles), station de référence belge en matière de climatologie (Institut royal météorologique, IRM) et site urbain.

Mots-clés

Rayonnement solaire global, transparence, transmittance, ciel clair, Belgique

Abstract

This paper deals with the study of the transparency of the atmosphere on clear sky at the Mont Rigi (Belgian Hautes-Fagnes) with the aim of underlining the particularities of the air composition in the Hautes-Fagnes region and quantifying its influence on global solar radiation. We used the following data : solar elevation, water vapor content (characterized by atmospheric water depth) and solar extraterrestrial irradiation at the top of the atmosphere. Due to a lack of direct information about atmospheric pollution, we compared global radiation received at the Hautes-Fagnes scientific station (SSHF) on clear sky with that stored in the same conditions in Uccle (Brussels), the Belgian reference station (Royal meteorological institute, RMI) and urban area.

Keywords

Global solar radiation, transparency, transmittance, clear sky, Belgium

INTRODUCTION

Le rayonnement solaire mesuré au Mont Rigi, à la Station Scientifique des Hautes-Fagnes (SSHF) appartenant à l'Université de Liège, n'a pas encore fait l'objet d'une étude spécifique. La mise en place, en 2001, d'une station automatique, fruit d'une collaboration entre l'Institut Royal Météorologique (IRM), l'Université de Liège et la Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement, Division de la Nature et des Forêts dépendant de la Région Wallonne (DGRNE), est la source d'une large collecte de données météorologiques automatisées et télémessurées quotidiennement, notamment des mesures de durée d'insolation et de rayonnements visible et infrarouge.

Cette recherche est menée dans la région des Hautes-Fagnes qui est réputée pour son climat et sa flore beaucoup plus septentrionaux que ceux des régions limitrophes. Le Mont Rigi enregistre régulièrement

pour divers éléments météorologiques habituels (températures, précipitations, enneigement,...) des valeurs remarquables pour la Belgique (Mormal et Tricot, 2004), ce qui laisse présager des résultats particuliers au niveau des valeurs de rayonnement.

Les résultats exposés dans cette contribution constituent une partie des recherches menées dans le cadre d'un mémoire réalisé en vue de l'obtention du grade de licencié en Sciences Géographiques à l'Université de Liège (Dury, 2006).

I. PRÉSENTATION DU SITE ET DES DONNÉES

A. Caractérisation de la station du Mont Rigi

Le site du Mont Rigi (lat. 50°30' N, long. 6°04' E, alt. 674 m) est situé à l'est de la Belgique, quasi au sommet du plateau des Hautes-Fagnes, point culminant de ce pays.

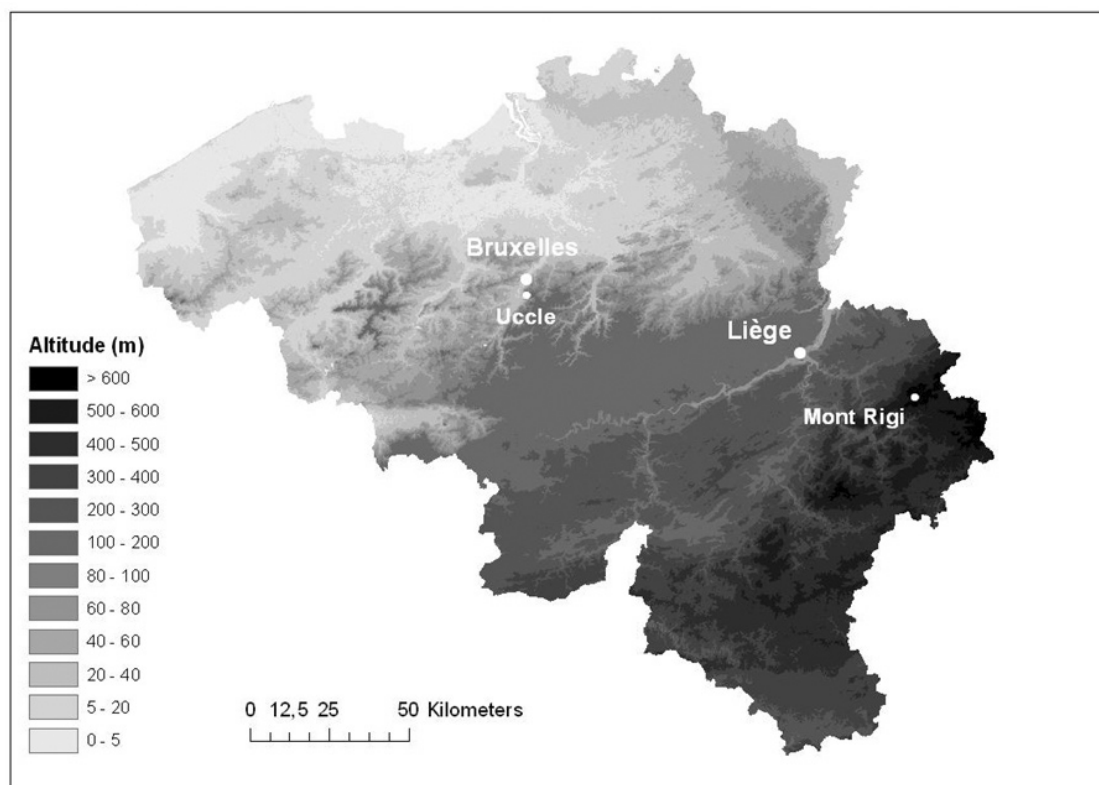


Figure 1. Localisation des stations du Mont Rigi et d'Uccle sur la carte orographique de Belgique

Cette crête orographique au sommet très aplani sur laquelle se trouve la SSHF constitue la première véritable barrière naturelle rencontrée par les masses d'air océanique en provenance de la mer du Nord ou de l'océan Atlantique. Cette situation entraîne des températures plus basses que dans le reste du pays, des précipitations plus abondantes de pluie et de neige et des persistances plus fréquentes de bruines faisant donc de cette région une terre humide et froide. L'amplitude des températures des trois années 2004 à 2006 concernées par cette étude a atteint 44°C avec une température minimale de - 12°C et une température maximale de 32°C. Le Mont Rigi se retrouve également dans le brouillard bien plus fréquemment que le reste de notre territoire (environ 150 jours par an).

B. Données et instruments

Pour cette recherche, nous avons exploité :

- les données enregistrées par les instruments de la SSHF installés et gérés par l'IRM. Ces données sont récoltées au pas de 10 minutes. Trois années civiles complètes ont servi de support à cette recherche : 2004 à 2006. Afin d'étoffer notre échantillon comparatif de journées à ciel resté parfaitement clair à la fois au Mont Rigi et à Uccle, nous avons retenu 14 journées des années 2001-2003.
- les observations et notes personnelles effectuées sur le site du Mont Rigi (nébulosité, état du ciel, types de temps, suivi des appareils,...) ;
- des contrôles de l'absence de couverture nuageuse ou de la présence éventuelle de voile nuageux (cirrus ou cu-

mulus) ont été réalisés grâce aux relevés des observateurs météorologiques de la station météorologique d'Elsenborn (Météo Wing de la Force aérienne de Belgique), située à une dizaine de kilomètres au sud-est du Mont Rigi et à 565 m d'altitude.

Les mesures de rayonnement solaire global ont été saisies à la SSHF par un radiomètre CNR1 de la marque Kipp & Zonen, placé à 2 mètres du sol. La durée d'insolation fut, quant à elle, mesurée par un héliographe Soni à système rotationnel.

Bien que la plupart des appareils utilisés soient conçus pour résister aux vicissitudes d'un environnement extérieur assez rude, il ne fut pas toujours aisé d'allier relevés automatiques et conditions météorologiques. Ce fut le cas notamment lors des conditions de brouillard et de givre très fréquentes sur le haut plateau des Fagnes et lors de précipitations de neige.

II. VARIABLES PRISES EN COMPTE

Au cours de sa traversée de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire subit de profondes modifications, spectrales et énergétiques, causées par des phénomènes d'absorption, de diffusion et de réflexion engendrés par les constituants de l'atmosphère. Ces modifications, qui sont d'autant plus importantes que la masse d'air traversée est grande, ont pour conséquence un affaiblissement du rayonnement qui arrive au sol. En l'absence de nuages, la quantité d'éclairement qui parvient au sol dépend de la turbidité de l'atmosphère locale qui est liée, rappelons-le,

aux constituants de l'air sec (N_2 , O_2 , Ar ,...) mais aussi à la vapeur d'eau comme aux particules en suspension et aux divers aérosols (pollutions atmosphériques).

Pour estimer la transparence de l'atmosphère au Mont Rigi par ciel clair, nous utiliserons les paramètres suivants : la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon, la hauteur d'eau condensable et le rayonnement solaire global mesuré à 2 m du sol et calculé pour une surface horizontale située à la limite supérieure de l'atmosphère. Les phénomènes responsables de l'affaiblissement du rayonnement solaire agissent différemment selon la longueur d'onde envisagée. Cependant, dans notre étude, nous devons considérer le rayonnement incident dans sa globalité et non par longueurs d'onde distinctes subissant des altérations différentes puisque nous ne possédons pas les instruments *ad hoc*. Par ailleurs, l'influence des diverses impuretés atmosphériques (aérosols, pollens,...) ne pourra être traitée dans ce travail étant donné que nous ne disposons d'aucune donnée quant à leur composition, leur profil vertical et leur concentration. Toutefois, pour pallier cette lacune, nous comparerons le rayonnement solaire global reçu à la station du Mont Rigi au rayonnement du même type reçu à la station d'Uccle, station de référence belge en matière de climatologie située à 5,5 km au sud du centre de la ville de Bruxelles, à une altitude de 105 m. Pour rappel, cette comparaison se limitera aux conditions de ciel clair, en considérant que ces deux sites se trouvent dans des environnements totalement différents (l'un rural et l'autre urbain) mais relativement peu éloignés l'un de l'autre (125 km à vol d'oiseau).

A. Trajet apparent du Soleil dans le ciel

La hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon (h) (Figure 2), appelée conventionnellement hauteur angulaire ou encore son complémentaire, l'angle solaire zénithal Z , qui est l'angle entre le Soleil et la verticale locale, joue un rôle essentiel dans l'estimation de la transparence de l'atmosphère. En effet, plus le Soleil est bas sur l'horizon, plus le trajet parcouru par ses rayons est grand et plus l'altération de ce rayonnement est importante.

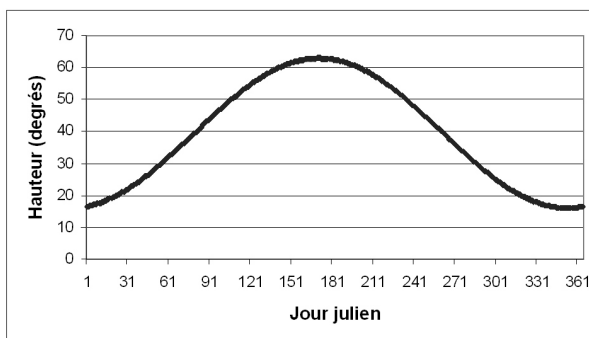


Figure 2. Variation annuelle de la hauteur maximale journalière du Soleil au-dessus de l'horizon au Mont Rigi

Le calcul de la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon à tout moment de la journée a tenu compte de la variation au cours de l'année du midi solaire local. À Uccle, celui-ci varie au cours de l'année entre 11h26 TU et 11h56 TU (*Annuaire de l'Observatoire royal de Belgique*, 2004-2006). La longitude d'Uccle est de 4°20' E et celle du Mont Rigi de 6°04' E. Le midi solaire varie donc de 11h19 TU à 11h49 TU au Mont Rigi.

La déclinaison du Soleil a été calculée à l'aide de la fonction suivante (IRM).

$$\delta = 0,33281 + (\sin(0,0172024 * jj) * 3,7872) + (\cos(0,0172024 * jj) * -22,984) + (\sin(0,0172024 * jj * 2) * 0,03205) + (\cos(0,0172024 * jj * 2) * -0,3499) + (\sin(0,0172024 * jj * 3) * 0,07187) + (\cos(0,0172024 * jj * 3) * -0,1398) \quad (1)$$

dans laquelle jj est le numéro du jour au cours de l'année civile (jour julien).

B. Estimation de la hauteur d'eau condensable

Pour estimer l'influence de la vapeur d'eau sur le rayonnement solaire (absorption du rayonnement surtout), la hauteur d'eau condensable a été calculée grâce aux formules suivantes :

- pression partielle de l'air sec $e_{(T)}$ (Alt, 1978 cité dans Guyot, 1999) :

$$e_{(T)} = 6,1070 \left[1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{T}{3}\right) \right]^{8,827} \quad (2)$$

avec T en °C, sous abri à 1 m 50 du sol, et $e_{(T)}$ en hPa.

- pression partielle de la vapeur d'eau au sol $e_{(Td)}$:

$$e_{(Td)} = e_{(T)} \cdot \frac{H \%}{100} \quad (3)$$

avec H sous abri à 1 m 50 du sol.

- hauteur d'eau condensable w (formule de Hann suggérée par Dogniaux, 1984, et adaptée pour cette étude) :

$$w = 17 \cdot e_{(Td)} \quad (4)$$

avec w en mm et e en hPa.

La figure 3 présente la variation de la hauteur d'eau condensable moyenne mensuelle au Mont Rigi et à Uccle pour les années 2004, 2005 et 2006, ainsi que l'évolution de l'écart de ce paramètre entre les deux sites.

Étant donné que la capacité hygrométrique de l'air augmente avec la température de l'air, c'est durant l'été (juillet, août et septembre) que l'on observe les valeurs de hauteurs d'eau condensable les plus élevées. Nous

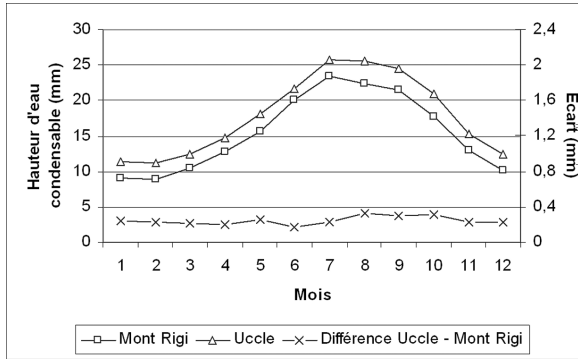


Figure 3. Moyenne mensuelle de la hauteur d'eau condensable au Mont Rigi et à Uccle et écart entre les deux sites (période de référence : 2004-2006)

observons le même type d'évolution dans les deux sites avec des valeurs plus élevées à Uccle en raison d'une température généralement plus élevée (gradient vertical de température). Toutefois, durant le milieu de la période végétative (juin-juillet), l'écart diminue entre le Mont Rigi et Uccle. En effet, l'accroissement de la teneur en vapeur d'eau de l'air est plus marqué au Mont Rigi : les lames d'eau évapotranspirées par les associations végétales de la Fagne n'y sont pas étrangères.

La variation de la lame d'eau condensable de l'atmosphère par ciel serein calculée à l'aide des formules d'Alt et de Hann sur base de données au sol est confirmée par les réanalyses du centre européen ECMWF. La figure 4 présente l'évolution de la somme du contenu en eau (liquide, vapeur, glace) de toute la colonne verticale troposphérique pour le point de grille le plus proche de Liège (lat. 50°36' N, long. 6°36' E). Pour une situation météorologique donnée et pour la Belgique, la lame d'eau condensable ne varie pas beaucoup d'un endroit à l'autre, sauf à proximité du sol. Nous l'avons mis en évidence entre le Mont Rigi et Uccle.

L'influence de cette variation de la colonne troposphérique en vapeur d'eau de l'air au cours de l'année sur la transparence de l'atmosphère lors de journées claires sera analysée plus loin.

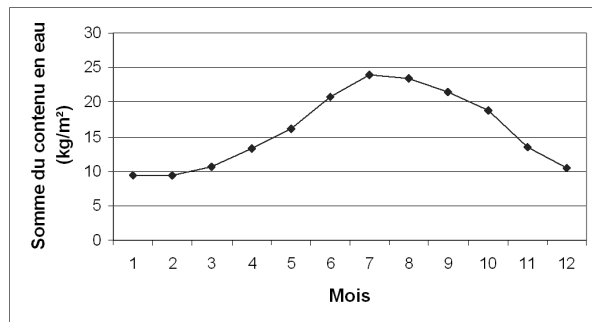


Figure 4. Moyenne mensuelle du contenu en eau de la colonne troposphérique pour un point de grille lat. 50°36' N, long. 6°36' E (période de référence : 2004-2006) (NB : 1 mm H₂O = 1 l H₂O / m² = 1 kg H₂O / m²)

C. Estimation du rayonnement solaire global reçu à 12 h TU à la limite supérieure de l'atmosphère

Pour rappel, la constante solaire est égale à 1367 W/m² et est par définition l'irradiance à une unité astronomique du Soleil (1 UA ≈ longueur du demi-grand axe de l'orbite terrestre). Cependant, le rayonnement solaire extraterrestre global varie au cours de l'année suite à la variation de la distance Terre-Soleil (Figure 5). L'influence de la distance Terre-Soleil a été formulée par Cracknell *et al*, 1991 :

$$E_0 = 1367 / (1 - 0,0167 \cos \left(\left(\frac{2\pi}{365} \right) (jj - 3) \right))^2 \quad (5)$$

avec *jj* le jour julien.

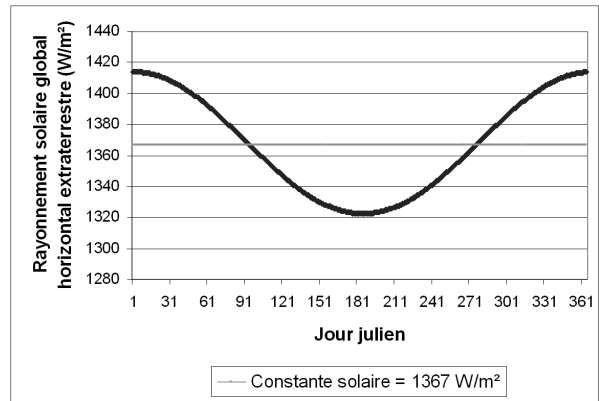


Figure 5. Variation du rayonnement solaire global extraterrestre au cours de l'année

La relation 6 permet de calculer le rayonnement solaire global au sommet de l'atmosphère sur une surface horizontale (Figure 6).

$$E_s = E_0 \sin h \quad (6)$$

avec E_0 la constante solaire et *h* la hauteur précise du Soleil au-dessus de l'horizon local.

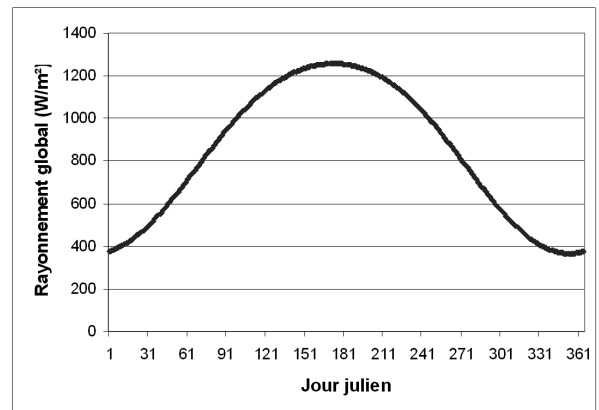


Figure 6. Rayonnement global reçu au sommet de l'atmosphère au Mont Rigi au cours de l'année à 12 TU

Par ciel clair, la quantité d'énergie solaire globale reçue au sol sur une surface horizontale E_s peut être estimée à condition de connaître la valeur du coefficient global de transmission a (Kondratyev, 1969 adaptée par Hufty, 2001) :

$$E_s = E_0 a^m \sin h \quad (7)$$

avec m l'épaisseur optique.

Dans notre cas, le coefficient a^m doit être recherché pour une série de journées claires au Mont Rigi. Pour ce faire, le rapport entre l'énergie solaire visible enregistrée par le capteur au sol et la même énergie calculée au sommet de l'atmosphère sera calculé. Dans la suite de cette

étude, le coefficient a^m sera appelé « transmittance » de l'atmosphère, terme davantage utilisé en télédétection, pour exprimer la fraction du rayonnement solaire transmis par l'atmosphère.

Le coefficient global de transmission a varie de 0,5 à 0,9 et est de l'ordre de 0,7 à Bruxelles (50° 48' N) (Hufty, 2001).

Finalement, pour calculer l'énergie solaire globale journalière reçue à la limite de l'atmosphère, on a utilisé la relation :

$$E_s = 2 E_0 \int_{H=0}^{1/2 \text{ jour } (^{\circ})} \sin h \, dH \quad (8)$$

avec :

$$\text{- durée du } \frac{1}{2} \text{ jour (en } ^{\circ}) = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (9)$$

$$\text{- } \sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H \quad (10)$$

- φ = latitude du lieu

- δ = déclinaison du Soleil

- H = angle horaire

III. RÉSULTATS

A. Transparence de l'atmosphère par ciel clair au Mont Rigi

1. Variation annuelle de la transmittance de l'atmosphère

Les journées ou parties de journées à ciel serein (nébulosité de 0 octa) ont été sélectionnées suite aux enregistrements de la durée de l'ensoleillement direct obtenus à l'aide d'un héliographe Soni installé à la SSHF confirmés par les *Cahiers d'observations* de la station météo synoptique militaire d'Elsborn. La figure 7 présente la variation annuelle de la transmittance au moment du midi solaire local par ciel totalement dégagé. Cet échantillon a été constitué à partir des données de 2004 à 2006. Quatorze journées des années 2001 à 2003, dont nous nous servirons surtout au point B, viennent compléter cet exemplaire.

La transmittance de l'atmosphère en milieu de journée par ciel clair varie au cours de l'année au Mont Rigi.

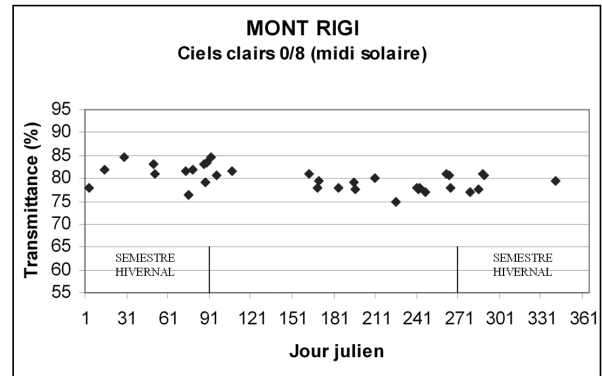


Figure 7. Transmittance de l'atmosphère par ciel clair (nébulosité de 0/8) au Mont Rigi

Elle oscille entre 75 et 85 %.

Les journées à ciel serein étant peu fréquentes au Mont Rigi, nous avons étendu cette sélection stricte de ciel sans nuages aux journées nébulosité d'un octa avec une couverture nuageuse correspondant soit à des cirrus de catégorie 1 (filaments n'envahissant pas progressivement le ciel), soit à des cumulus de catégorie 1 (à faible extension verticale, cumulus de beau temps) ou encore les deux types présents à la fois (Figure 8). Il a été démontré que ces types de couverture nuageuse absorbent très peu le rayonnement solaire global (Dury, 2006).

Nonobstant cet échantillon plus large mais moins homogène, la transmittance de l'atmosphère reste similaire à

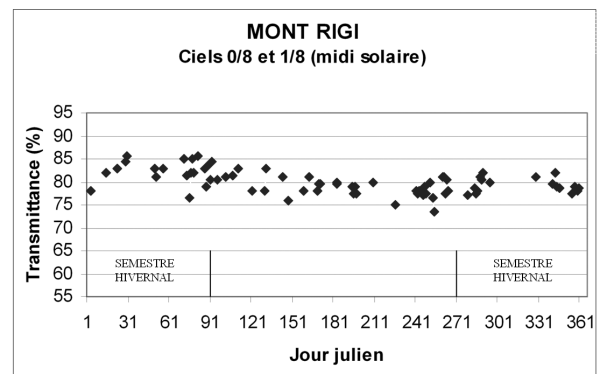


Figure 8. Transmittance de l'atmosphère par ciel de nébulosité de 0/8 et 1/8 au Mont Rigi

celle de la figure 7. Toutefois, les observations ayant été faites au moment du midi solaire ; à ce moment, en juin, le Soleil atteint au Mont Rigi une hauteur de plus de 60° au-dessus de l'horizon local (Figure 2) et le trajet effectué par le rayonnement solaire direct à midi est donc plus court que celui de décembre (h inférieur à 20°).

2. Variation journalière de la transmittance de l'atmosphère

Les figures 9 et 10 présentent l'évolution du rayonnement global au cours de deux journées durant lesquelles le ciel était absolument serein. Le rayonnement global au sol atteignait près de 430 W/m² lors du midi solaire le 29

janvier 2006 et près de 950 W/m^2 le 12 juin 2006.

La figure 11 montre les transmittances calculées pour ces deux journées. La transmittance journalière est de 80 %

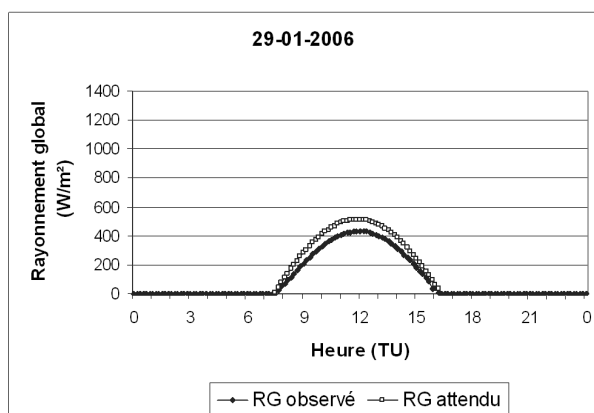


Figure 9. Rayonnement global au Mont Rigi (29 janvier 2006)

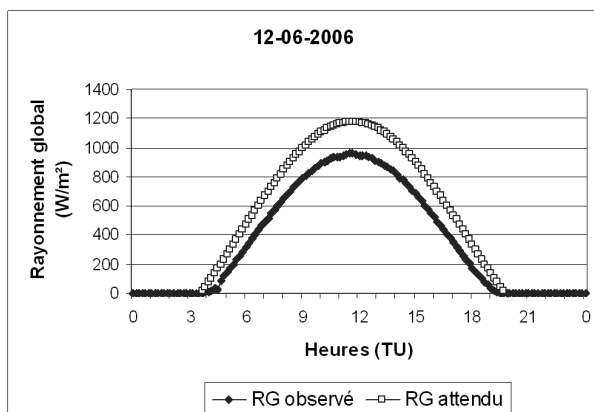


Figure 10. Rayonnement global au Mont Rigi (12 juin 2006)

le 29 janvier et de 75 % le 12 juin. Nous remarquons, par exemple, qu'au midi solaire, la transmittance est plus faible pour la journée de juin (81 %) que pour la journée de janvier (84,5 %) alors que la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon à ce moment de la journée est beaucoup plus faible en janvier. Le soleil culmine à une hauteur de 21° pour la journée de janvier et à 62° en juin.

Ces deux exemples offrent donc l'opportunité de suivre de manière systématique l'évolution du rayonnement

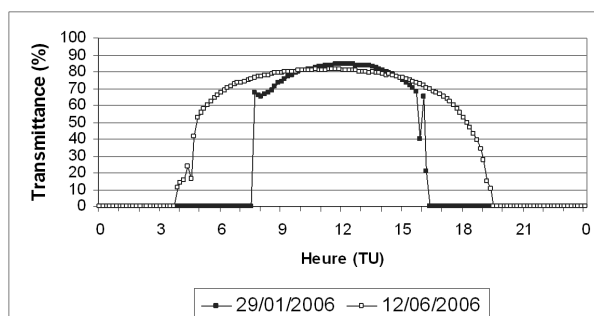


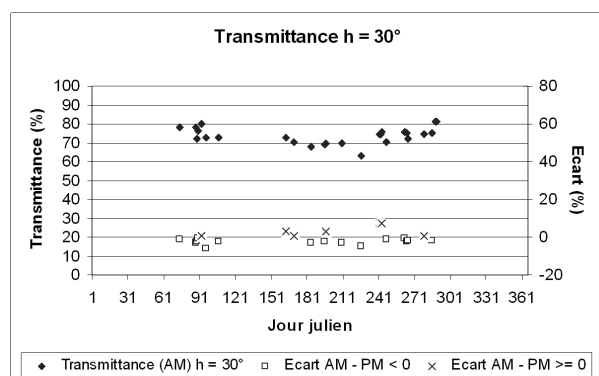
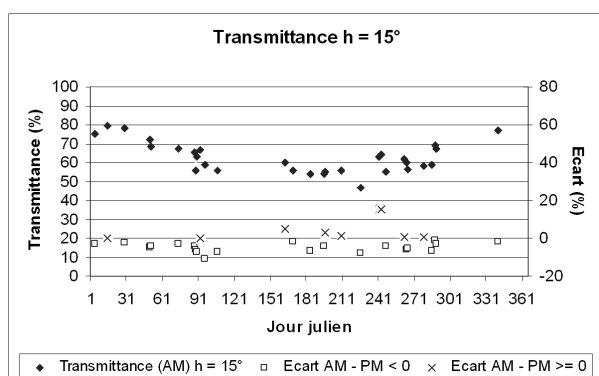
Figure 11. Transmittance de l'atmosphère au Mont Rigi (29 janvier 2006 et 12 juin 2006)

solaire global et de la transmittance au cours de journées à ciel serein où l'évolution du rayonnement solaire est essentiellement liée à la hauteur du Soleil. En effet, la transmittance atteint son maximum lors du midi solaire (moment de la journée où le trajet parcouru par les rayons du Soleil dans l'atmosphère terrestre est le plus court). Les figures 12 et 13 présentent respectivement l'évolution saisonnière des valeurs de transmittance pour des hauteurs de 15° et 30° le matin (période ascensionnelle du Soleil) et les écarts, pour une même hauteur angulaire, entre le matin (AM) et l'après-midi (PM). Ces figures ne prennent en compte que les journées au cours desquelles un ciel parfaitement serein était observé aux moments correspondants aux hauteurs du Soleil respectivement égales à 15° et 30° le matin comme l'après-midi. Pour une même hauteur du Soleil, l'évolution de la transmittance au cours de l'année est plus marquée que celle mise en évidence au midi solaire (Figures 7 et 8). Nous constatons une diminution de la transmittance entre le semestre hivernal et le semestre estival (du jj 91 au jj 271). Cette tendance est à mettre en relation avec les observations faites sur l'évolution de la teneur en vapeur d'eau (II.B). En effet, l'augmentation de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air durant les mois les plus chauds entraîne une augmentation de la turbidité de la masse d'air et une diminution du rayonnement solaire global parvenant au sol.

Cette augmentation de la turbidité durant les mois les plus chauds résulte peut-être aussi d'une concentration en aérosols et micro particules plus importante en été qu'en hiver. En effet, en été, la convection est plus intense par ciel dégagé et elle favorise le soulèvement et le maintien en suspension de micro particules (pollens, poussières,...). Idso (1970) signale que la quantité de poussières atmosphériques varie au cours de l'année, ce qui pourrait avoir un impact sur la transmittance de l'atmosphère. On peut toutefois la considérer comme constante et se fonder uniquement sur l'évolution de la teneur en vapeur d'eau sans introduire une erreur importante.

Au vu des différences de transmittance entre le matin et l'après-midi, on constate que la transmittance est en général plus faible le matin que l'après-midi (écarts < 0) à même hauteur du Soleil et par ciel clair. C'est uniquement en période estivale que nous observons des cas où la transmittance est plus grande le matin (écarts > 0). Ce phénomène est vraisemblablement le résultat d'une turbidité plus importante en seconde partie de journée en raison du réchauffement convectif provoquant une hauteur de mélange plus grande au-dessus de cette région naturelle très humide.

La figure 14 présente l'évolution de la hauteur d'eau condensable calculée à une hauteur du Soleil de 15° le matin et les différences entre ces valeurs et celles de l'après-midi à même hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon. Il s'agit du même échantillon de journées que celui



Figures 12 et 13. Transmittance de l'atmosphère pour $h = 15^\circ$ et $h = 30^\circ$. Axe de gauche : transmittance mesurée au cours de la matinée pour la hauteur envisagée. Axe de droite : transmittance matinée moins transmittance après-midi

des figures 12 et 13. Dans la majorité des cas, la hauteur d'eau condensable de l'air est plus élevée l'après-midi que le matin (écarts < 0). Ces valeurs de hauteur d'eau condensable ont été calculées, rappelons-le, à partir de données au sol, mais elles sont en accord avec les données du contenu en eau de la colonne troposphérique calculées par l'ECMWF pour un point de grille le plus proche de Liège (lat. $50^\circ 36' N$, long. $6^\circ 36' E$).

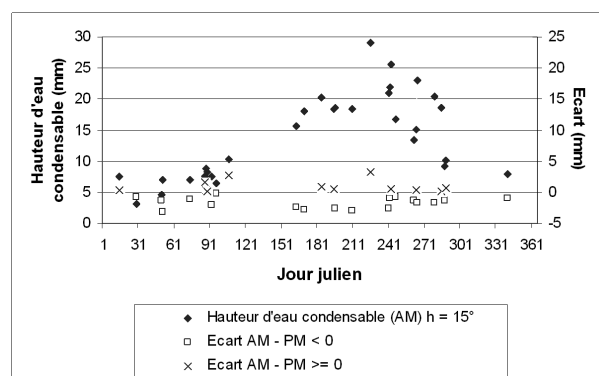


Figure 14. Hauteur d'eau condensable pour $h = 15^\circ$. Hauteur d'eau condensable reportée pour la matinée et écart entre matinée et après-midi à même hauteur du Soleil

B. Comparaison avec Uccle

Nous avons signalé ne posséder aucune donnée pour caractériser, au Mont Rigi et alentours, l'état de l'atmosphère au point de vue des diverses pollutions (composition et concentration). Comparons dès lors, comme nous le proposons, les valeurs de rayonnement global (RG) mesurées au Mont Rigi avec celles d'Uccle (cf. *Bulletin mensuel de l'I.R.M.*). Rappelons la position de la station du Mont Rigi (SSHF) au milieu des Hautes-Fagnes, région naturelle à l'écart des pollutions urbaines et industrielles alors que l'I.R.M. est situé à Uccle, soit dans une commune relativement aérée mais urbanisée en périphérie de Bruxelles. Nous formulons l'hypothèse que ce site urbain, plus exposé aux pollutions que celui des Fagnes, présente des valeurs de transmittance plus faibles qu'au Mont Rigi par temps clair. Si cette hypothèse est vérifiée, nous pourrions en déduire que l'atmosphère au Mont Rigi présente bien une plus grande pureté.

Dans le *Bulletin mensuel de l'I.R.M.*, une page est consacrée au rayonnement solaire à Uccle. Les valeurs journalières du rayonnement global observé et attendu sur une surface horizontale y sont notamment fournies. Précisons que les valeurs attendues correspondent aux valeurs corrigées des effets de l'atmosphère. En adoptant pour Bruxelles un coefficient moyen de transmission arbitraire de 0,7 (II.C), les valeurs attendues données dans le *Bulletin* correspondent à 70 % du rayonnement global au sommet de l'atmosphère. Pour pouvoir comparer la transparence de l'atmosphère entre ces deux sites, nous avons donc effectué le rapport entre les valeurs observées dans les deux stations et le rayonnement global reçu à la limite supérieure de l'atmosphère calculé pour le Mont Rigi et pour Uccle à l'aide de la relation 8.

Pour procéder à cette comparaison, nous n'avons évidemment sélectionné que les jours parfaitement clairs (nébulosité de 0/8) à la fois au Mont Rigi et à Uccle. Le nombre de jours répondant à cette condition étant trop petit pour la seule période 2004-2006, nous avons donc étendu notre sélection aux années 2001 à 2003.

Le tableau 1 reprend les 22 journées à ciel parfaitement clair que nous avons pu retenir ainsi que quelques variables météorologiques (humidité relative à 6h, 12h et 18h, température du point de rosée, température maximale, amplitude de température et température moyenne) qui permettent de caractériser ces journées et qui mettent en lumière les différences entre les Hautes-Fagnes et Uccle. En raison de son altitude, le Mont Rigi présente des températures généralement plus faibles qu'à Uccle ($\approx -0,65^\circ C/100\text{ m}$). Pour chaque journée, nous avons calculé la température moyenne du point de rosée T^d à partir de la température moyenne et de la moyenne des mesures d'humidité relative (6h, 12h et 18h). Il est intéressant de noter que toutes ces journées correspondent à des conditions anticycloniques associées à une advection de courants continentaux.

Tableau 1. Caractérisation -mois après mois- des 22 journées à ciel parfaitement clair par quelques variables thermohygrométriques au Mont Rigi et à Uccle

Date	Humidité relative *						T _d moyenne		T° maximale		Amplitude de T°		T° moyenne	
	Mont Rigi			Uccle			Mont Rigi	Uccle	Mont Rigi	Uccle	Mont Rigi	Uccle	Mont Rigi	Uccle
	6h	12h	18h	6h	12h	18h								
4/01/2002	-	-	-	56	39	54	-	-10,6	1,3	2,9	8,5	8,5	-3,0	-1,4
29/01/2006	33	26	36	73	49	44	-15,0	-9,4	5,1	4,0	10,3	11,2	-0,1	-1,6
19/02/2003	69	52	64	65	42	52	-9,2	-7,7	1,8	6,7	9,3	11,9	-2,9	0,8
15/03/2003	83	57	64	76	41	47	-3,6	-3,1	6,5	10,2	9,7	9,8	1,7	5,3
28/03/2002	70	30	43	81	37	39	-	-1,5	-	14,3	-	13,4	-	7,6
30/03/2004	68	32	46	78	41	32	-2,6	-0,2	14,2	17,1	13,4	15,1	7,5	9,6
6/04/2002	74	40	48	57	32	38	-5,8	-4,9	7,0	11,1	8,8	8,3	2,6	7,0
17/04/2003	53	22	26	51	26	25	-2,4	0,8	18,7	22,2	10,9	11,1	13,3	16,7
12/06/2006	50	36	38	54	31	29	6,2	7,4	25,6	30,1	11,9	15,4	19,7	22,4
19/06/2005	53	33	34	60	26	22	6,0	7,7	26,6	30,9	13,3	14,6	20,0	23,6
3/07/2001	76	51	48	79	48	43	9,1	12,2	23,0	27,1	11,4	12	17,3	21,1
14/07/2003	60	40	39	70	37	36	7,0	10,1	24,4	28,0	11,4	12,6	18,7	21,7
15/07/2003	55	37	38	54	32	35	8,3	10,2	27,7	31,7	12,8	14,2	21,3	24,6
29/07/2004	65	44	51	77	40	34	8,4	10,6	23,2	27,5	10,5	12,4	18,0	21,3
14/08/2001	92	50	54	84	50	53	13,0	14,6	26,0	29,3	12,6	14,4	19,7	22,1
31/08/2005	68	50	59	77	47	54	13,0	15,1	25,9	30,7	9,3	14,5	21,3	23,5
4/09/2003	74	45	62	90	38	50	5,9	7,7	20,2	21,7	13,7	12,3	13,4	15,6
19/09/2005	75	44	84	92	42	54	3,3	5,2	15,1	18,5	12,2	12,9	9,0	12,1
21/09/2006	90	63	74	88	48	56	9,6	11,9	21,4	27,6	15,2	17,4	13,8	18,9
15/10/2003	76	45	79	91	50	63	-0,2	2,1	10,6	12,5	10,3	9,8	5,5	7,6
16/10/2003	92	38	72	87	52	63	0,0	1,9	11,1	12,5	11	9,8	5,6	7,6
7/12/2003	92	95	93	86	66	75	-4,4	-4,0	-1,1	1,7	4,8	3,7	-3,5	-0,2

* Les valeurs d'humidité relative par temps de gel au Mont Rigi ne sont pas nécessairement toutes correctes.

Le tableau 2 donne la durée d'insolation de ces journées à ciel parfaitement clair pour le Mont Rigi et pour Uccle (en heures et minutes). Ces données ont été enregistrées par un héliographe Soni. Les valeurs du rayonnement global sont, quant à elles, exprimées

en joule par cm² par jour (J/cm²/jour) comme dans le *Bulletin mensuel de l'I.R.M.*, et non en W/m², ce qui a peu d'importance étant donné que c'est le rapport entre le rayonnement observé et le rayonnement attendu qui est recherché.

Tableau 2. Durée d'insolation, rayonnement global et transmittance au Mont Rigi et à Uccle

Date	Durée d'insolation H Min		RG (J/cm ² /jour)		RG attendu (J/cm ² /jour)		Transmittance (%)	
	Mont Rigi	Uccle	Mont Rigi	Uccle	Mont Rigi	Uccle	Mont Rigi	Uccle
4/01/2002	7 50	7 30	565	488	755	740	75	66
29/01/2006	8 30	8 10	854	705	1066	1050	80	67
19/02/2003	9 40	9 30	1209	1077	1536	1520	79	71
15/03/2003	11 10	11 00	1700	1591	2224	2210	76	72
28/03/2002	11 50	11 50	2049	1917	2618	2606	78	74
30/03/2004	11 55	11 55	2078	1946	2709	2696	78	72
6/04/2002	12 05	12 10	2199	2100	2886	2875	76	73
17/04/2003	12 50	12 40	2395	2268	3196	3187	75	71
12/06/2006	15 00	15 20	3124	3022	4157	4156	75	73
19/06/2005	15 05	15 40	3086	3065	4176	4175	74	73
3/07/2001	15 10	15 10	3000	2943	4138	4137	72	71
14/07/2003	14 30	14 20	2952	2893	4038	4036	73	72
15/07/2003	14 20	14 20	2893	2847	4026	4024	72	71
29/07/2004	14 00	14 10	2776	2675	3795	3791	73	71
14/08/2001	13 20	13 45	2371	2358	3479	3472	68	68
31/08/2005	12 20	12 50	2198	2051	3044	3034	72	68
4/09/2003	12 00	12 10	2085	1966	2932	2922	71	67
19/09/2005	11 30	11 50	1872	1745	2499	2486	75	70
21/09/2006	11 25	11 35	1820	1662	2440	2427	75	68
15/10/2003	10 05	10 00	1332	1236	1747	1732	76	71
16/10/2003	10 10	9 50	1291	1186	1720	1705	75	70
7/12/2003	7 40	7 00	581	486	767	751	76	65

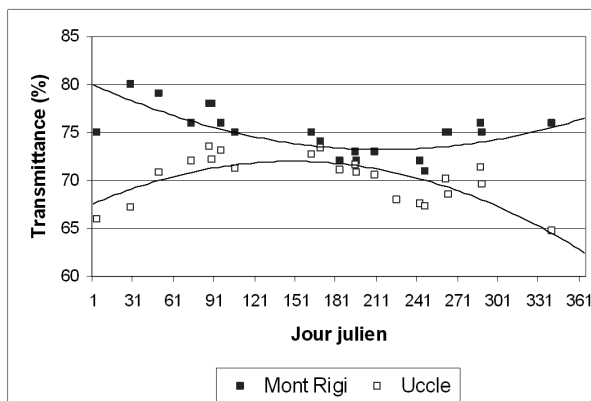


Figure 15. Transmittance journalière de l'atmosphère par ciel de nébulosité de 0/8 au Mont Rigi et à Uccle

D'après le tableau 2 et la figure 15, le rayonnement global enregistré au sol est supérieur au Mont Rigi avec des durées d'insolation qui, remarquons-le, ne sont toutefois pas toujours exactement identiques. La moyenne des transmittances de ces 22 jours est égale à 75 % au Mont Rigi et à 70 % à Uccle (pour un coefficient global de transmission de 0,7 à Bruxelles, cf. II.C). Nous constatons également que la transmittance évolue différemment dans les deux sites. Comme au point III.A.2. (Figures 12 et 13), nous observons que la transmittance diminue durant la période estivale au Mont Rigi. On note des transmittances journalières de l'ordre de 75 à 80 % du mois d'octobre à la mi-avril et des transmittances inférieures, entre 70 et 75 %, de la mi-avril à la fin septembre. À Uccle, c'est l'inverse que l'on constate. C'est en décembre et en janvier que l'on observe les transmittances journalières les plus faibles, de l'ordre de 65 %. Durant l'été, les deux sites présentent des transmittances quasi similaires.

Comme nous l'avons déjà spécifié, toutes ces journées correspondent à des conditions anticycloniques avec l'arrivée de courants continentaux. Ce type de conditions entraîne une grande stabilité des masses d'air et un mauvais mélange vertical. Attardons nous sur deux journées de notre échantillon qui permettent d'illustrer une situation en période hivernale (29 janvier 2006) et une situation en période estivale (19 juin 2005).

Le 29 janvier 2006 (jj 29, figure 15), la transmittance journalière est de 80 % au Mont Rigi et seulement de 67 % à Uccle. Cette journée traduit bien ce qui se passe en hiver par ciel clair lors de situations anticycloniques. Avant 13 heures, une inversion de température est constatée entre les deux sites (Figure 16).

Ce phénomène apparaît plus fréquemment en période hivernale. L'inversion de température régionale induit une mauvaise dispersion des pollutions et piège la vapeur d'eau près du sol. Ainsi, le Mont Rigi se situe au-dessus de ces accumulations d'air froid et humide et profite d'un air plus sec et limpide alors qu'Uccle est piégé sous cette masse d'air (Figures 17 et 18). Grâce aux stations

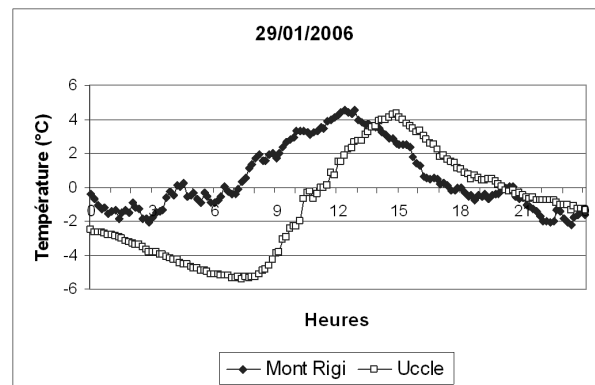


Figure 16. Température au Mont Rigi et à Uccle (29 janvier 2006)

de mesures d'Eupen (Institut Scientifique de Service public de la Région wallonne, ISSeP) et d'Uccle (Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, IGBE), nous pouvons comparer l'ampleur de la pollution atmosphérique de ces deux régions. Eupen n'est située qu'à 14 km du Mont Rigi mais malheureusement à 225 m d'altitude contre 674 au Mont Rigi. Cette différence d'altitude est importante mais les mesures effectuées à Eupen nous permettent toutefois d'obtenir une première estimation de la différence de qualité d'air entre les Hautes-Fagnes et Uccle. Nous n'exposerons ici aucune donnée sur les pollutions, mais cette comparaison Eupen-Uccle nous a permis de constater que durant des journées du type du 29 janvier 2006 on enregistre de bien plus hautes concentrations en pollution à Uccle qu'à Eupen. Étant donné son altitude bien supérieure et son éloignement de toutes sources de pollution, le Mont Rigi présente de plus faibles concentrations en pollution qu'à Eupen.

La journée du 19 juin 2005 (jj 170, figure 15) nous permet d'illustrer ce qu'on observe fréquemment en période estivale lorsque le ciel est serein. Contrairement à la journée du 29 janvier 2006, on remarque une égalisation des transmittances journalières : 74 % au Mont Rigi et 73 % à Uccle. Au lever du Soleil, la différence de température est très faible entre les deux sites (Figure 19) et l'humidité est plus importante dans le site urbain (Figure

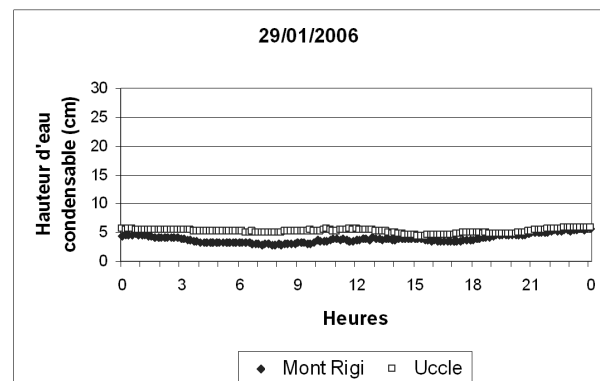


Figure 17. Hauteur d'eau condensable au Mont Rigi et à Uccle (29 janvier 2006)

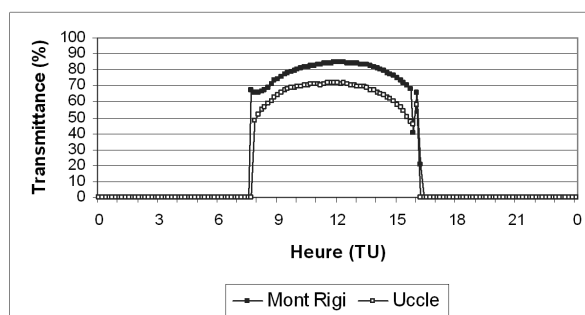


Figure 18. Transmittance de l'atmosphère au Mont Rigi et à Uccle (29 janvier 2006)

20). Les valeurs de transmittance sont donc plus élevées au Mont Rigi (Figure 21). Entre 10h et 11h du matin, la hauteur d'eau condensable devient supérieure au Mont Rigi. En effet, durant la saison estivale, l'évaporation et l'évapotranspiration sont plus importantes dans cette région marécageuse. À la figure 3, nous avons effectivement remarqué une plus grande augmentation de la hauteur condensable au Mont Rigi en juin et juillet. Ainsi, en seconde partie de journée, la teneur en vapeur d'eau est supérieure au Mont Rigi et la transmittance devient plus faible qu'à Uccle.

À Uccle, la basse troposphère est la plus transparente au printemps (jj 61 à jj 181, figure 15) lorsque les inversions de températures sont moins marquées, qu'elles ont donc moins d'impact sur la dispersion des pollutions et que, dans le même temps, la teneur en vapeur d'eau n'est pas encore maximale.

CONCLUSION

La transparence de l'atmosphère par ciel clair au Mont Rigi (point culminant de la Belgique) varie fortement entre l'hiver et l'été. Le transfert du rayonnement solaire à travers la troposphère et son évolution durant l'année semble surtout dépendre de la teneur en vapeur d'eau de l'air en raison de la grande humidité de la région des Hautes-Fagnes. Nous retrouvons les valeurs de transmittance journalière les plus élevées en janvier, février et mars (transmittance journalière variant entre 75 et 80 %). En hiver, en raison de son éloignement, tout relatif, des sources de pollution et de son altitude (674 m), le Mont Rigi présente un air plus transparent que celui d'Uccle, commune située dans la périphérie Sud de la ville de Bruxelles à une altitude voisine de 105 m. C'est durant la période estivale, lorsque la hauteur d'eau condensable est la plus élevée, que les valeurs de transmittance sont les plus faibles (transmittance journalière variant entre 70 et 75 %). La comparaison avec Uccle a permis de mettre en évidence la relative pureté de l'air des Hautes-Fagnes avec un rayonnement global enregistré systématiquement supérieur au Mont Rigi lors de conditions de ciel absolument clair.

Dans cet article, nous nous sommes concentrés sur le rayonnement solaire global par ciel clair. Nous avons

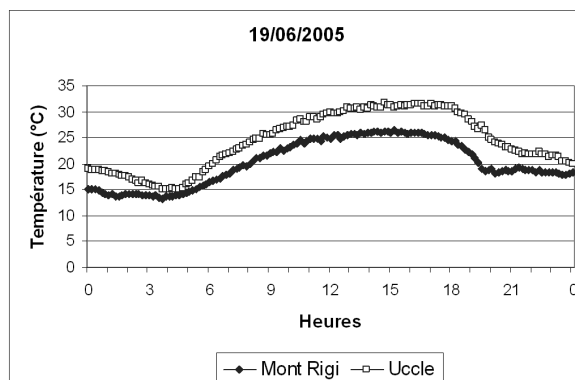


Figure 19. Température au Mont Rigi et à Uccle (19 juin 2005)

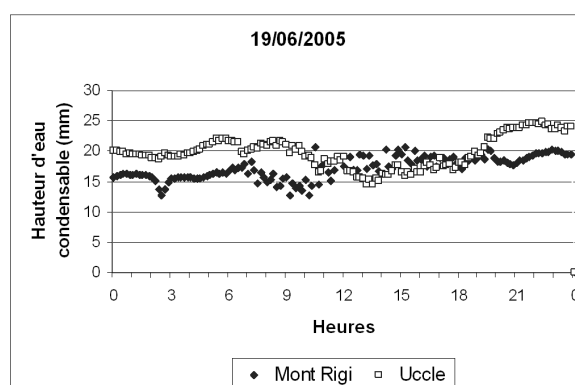


Figure 20. Hauteur d'eau condensable au Mont Rigi et à Uccle (19 juin 2005)

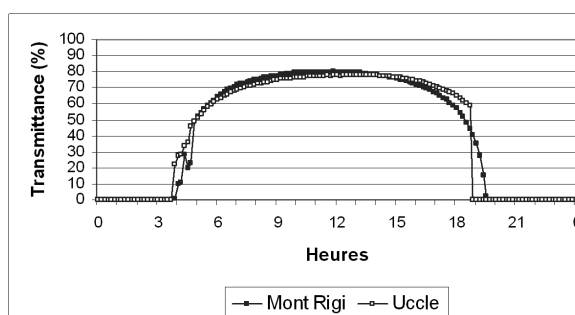


Figure 21. Transmittance de l'atmosphère au Mont Rigi et à Uccle (19 juin 2005)

toutefois ajouté à notre échantillon quelques journées avec des ciels de nébulosité 1/8 provoquée par de petits cumulus isolés ou quelques cirrus. Ce qui ne porte pas préjudice à nos résultats car nous avons pu observer que ce type de couverture nuageuse ne perturbait quasiment pas le transfert du rayonnement solaire global dans la troposphère.

Les résultats qui ont été exposés se basent uniquement sur des mesures réalisées au sol. Ces mesures de terrain ont permis d'obtenir une première estimation de la transparence de l'atmosphère et de la quantité de rayonnement solaire reçu au Mont Rigi et alentours.

Remerciements

Nous tenons à remercier Michel Mathys, permanent à

la SSHF et Sébastien Donato (IRM) pour la gestion des données ainsi que les membres de la station météorologique synoptique d'Elsenborn (Météo Wing-FAe), Messieurs Polis, Mairlot, Denis, Grisay, Ciulla, Duckaert, Schellingen, Heuse et Louvat, pour la qualité et la rigueur de leurs observations qui nous ont été d'une aide très précieuse. Merci à Jean-Michel Fallot pour ses remarques constructives.

BIBLIOGRAPHIE

- ANNUAIRE DE L'OBSERVATOIRE ROYAL DE BELGIQUE. 2003-2005. CLXXI^e-CLXXIII^e année, 2004-2006, Bruxelles.
- BULLETIN MENSUEL. 2004-2006. Observations climatologiques, Parties I et II, I.R.M., Bruxelles.
- CAHIER D'OBSERVATIONS. 2004-2006. Force aérienne belge, Elsenborn, inédit.
- CNR 1 NET-RADIOMETER. INSTRUCTION MANUAL, s.d., Kipp & Zonen, Delft, 46 p.
- CRANKNELL A. & HAYES L. 1991. *Introduction to Remote Sensing*. Taylor and Francis, Londres-New York, 304 p.
- DOGNIAUX R. 1984. *De l'influence de l'estimation du facteur total de trouble atmosphérique sur l'évaluation du rayonnement solaire direct par ciel clair. Application aux données radiométriques de l'I.R.M. à Uccle*, Miscellanea, sér. C, n° 20, I.R.M., Bruxelles, 29 p.
- DURY M. 2006. *Contribution à l'étude du rayonnement solaire à la station météorologique du Mont Rigi. Transparence de l'atmosphère et albédo*, ULg, Mémoire de licence en Sciences géographiques. Liège, 243 p., inédit.
- GUYOT G. 1999. *Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes*, Paris-Milan-Barcelone, 548 p.
- HUFTY A. 2001. *Introduction à la climatologie*. Ed. De Boeck Université, 542 p.
- ISO S.B. 1970. *The Transmittance of the Atmosphere for Solar Radiation on Individual Clear Days*. *Journal of applied meteorology*, pp. 239-241.
- KONDRATYEV K. 1969. *Radiation in the Atmosphere*. New-York : Academic Press, 912 p.
- MORMAL P. & TRICOT C. 2004. *Aperçu climatique des Hautes-Fagnes*. Publ. scientifique et technique, n° 036, I.R.M., Bruxelles, 27 p.

Adresse des auteurs :

Marie DURY
Rue Auguste Donnay, 111
B-4000 Liège
Marie.Dury@student.ulg.ac.be

Serge GINION
Institut Royal Météorologique
Avenue Circulaire, 3
B-1180 Bruxelles
Michel ERPICUM
Université de Liège
Institut de Géographie – Climatologie
Bât. B11 – Sart Tilman
B-4000 Liège
michel.erpicum@ulg.ac.be