

Rayonnement solaire

Dans un premier temps nous allons décrire le mode de calcul du rayonnement solaire, puis nous présenterons la validation du modèle élaboré sous SIG. Dans un deuxième temps nous étudierons la sensibilité d' Hélios, qui sera ensuite comparé à d'autres estimateurs du rayonnement solaire.

1) Méthode de calcul du rayonnement solaire

Pour plus de détails, se reporter aux articles suivant :

Piedallu, C. and Gégout, J.C., 2007. Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling. *Annals of Forest Science*, 64: 899-909.

Piedallu, C. and Gégout, J.C., sous presse. Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models. *Agricultural and forest meteorology*.

Les radiations à faible longueur d'onde (0.28-5 μm) peuvent être séparées en 3 composants : le rayonnement direct, le plus important, le rayonnement diffusé par l'atmosphère et qui dépend de sa composition, et le rayonnement réfléchi par le sol (Gates, 1980). Le rayonnement global, somme de ces trois composantes, est déterminé par trois groupes de facteurs : les relations géométriques entre le soleil et la surface de la terre, l'atténuation due à la traversée de l'atmosphère, et les facteurs topographiques (Hofierka and Suri, 2002). Des formules astronomiques permettent de calculer les relations géométriques entre le soleil et la terre en fonction de la localisation et du moment. Le facteur d'atténuation atmosphérique est conditionné par la présence de gaz, et de particules solides ou liquides, qui sont fonction de l'épaisseur de l'atmosphère et donc de l'altitude. Les facteurs topographiques induisent de fortes variations à l'échelle locale du fait des variations de pente et d'exposition, qui modifient l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Les effets de masque de versant opposés peuvent également jouer un rôle important. Ils peuvent être simulés à l'aide d'un modèle numérique de Terrain, avec une grande précision qui sera cependant fonction de la qualité du MNT utilisé. Nous avons choisi de prendre en considération l'atténuation par les nuages de façon séparée, permettant le calcul du rayonnement sous ciel clair ou sous ciel nuageux, et éventuellement d'intégrer différentes sources de couverture nuageuse. Pour cela nous utilisons des équations empiriques basées sur des mesures de terrain réalisées en Allemagne et fournies par Kasten et Czeplak (Kasten and Czeplak, 1980)

11) Géométrie entre le soleil et la terre

La position du soleil dans le ciel est fonction de l'heure et de la latitude. Au début du calcul une grille avec des valeurs de latitude est générée pour chaque pixel, permettant par la suite l'utilisation de la latitude comme variable.

La position du soleil est définie par deux angles caractérisant l'altitude et l'azimut solaire :

$$\sin \alpha = \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \eta * \cos \delta$$

avec φ la latitude pour chaque cellule, η étant l'heure solaire, δ la déclinaison solaire, qui varie en fonction du jour julien J :

$$\delta = 23.45 * \sin(360 (284 + J) / 365)$$

l'azimuth solaire (β) est l'angle entre le soleil et le nord. Nous avons utilisé la formule d'Oke (Oke, 1987) :

$$\cos \beta = (\sin \delta * \cos \varphi - \cos \delta * \sin \varphi * \cos \eta) / \cos \alpha$$

12) Caractéristiques du flux solaire

Nous avons calculé le flux solaire à la sortie de l'atmosphère (R_{out} , W/m²) avec le modèle de Kreith and Kreider (1978). Le flux solaire est fonction de la constante solaire Sc (valeur utilisée fournie par le World Radiation Center, 1367 W/m²), et le jour de l'année (J) :

$$R_{out} = Sc * (1 + 0.034 * \cos (360 J/365))$$

Le coefficient de transmissivité τ^M représente la fraction du rayonnement incident à la surface de l'atmosphère qui atteint le sol le long d'une trajectoire verticale. Nous avons choisi une valeur de 0.6 pour τ (Gates, 1980). M représente la longueur du trajet en fonction de l'azimuth solaire. En zone de montagne, il est nécessaire d'utiliser un facteur de correction lié à la pression atmosphérique p/p_0 , qui dépend de l'altitude. Nous avons utilisé les formules de List (1984) et Kreith and Kreider (1978) :

$$M = M_0 * P/P_0$$

P/P_0 (mbar/mbar) étant le facteur de correction de la pression atmosphérique :

$$P/P_0 = ((288 - 0.0065 * h) / 288)^{5.256}$$

h étant l'altitude et M_0 étant calculé grâce à la formule suivante :

$$M_0 = \sqrt{1229 + (614 * \sin \alpha)^2} - 614 * \sin \alpha$$

13) Effets liés à la topographie

Pour calculer le rayonnement sur des zones pentues, il est nécessaire de prendre en compte l'angle d'incidence entre le rayon solaire et la surface du sol ($\cos i$). Il varie en fonction de la position du soleil et de la topographie (Campbell, 1981) :

$$\cos i = \cos \alpha * \sin \chi * \cos (\beta - \beta_s) + \sin \alpha * \cos \chi$$

χ étant la pente (degrés), et β_s l'exposition (degrés).

14) Calcul du rayonnement global

Le calcul horaire du rayonnement global est obtenu par la somme des composantes directes (R_{dir}), diffuses (R_{diff}) et réfléchies (R_{ref}) :

$$R_{dir} = Sh * R_{out} * \tau^M * \cos i$$

Sh étant une valeur binaire d'ombrage calculée pour chaque heure de la journée et chaque valeur entière d'angle solaire (α) et d'azimuth solaire (β) (table I). Sh est calculé en utilisant la commande "Hillshade" du logiciel Arcinfo, qui permet de simuler la projection d'un rayon lumineux de la position estimée du soleil vers le MNT. Quand la cellule est à l'ombre des montagnes voisines la valeur 0 est affectée, sinon c'est la valeur 1.

Nous avons utilisé le modèle isotropique de Liu and Jordan (1960) pour calculer le rayonnement réfléchi. Ce modèle prend en compte l'angle solaire et la transmissivité de l'atmosphère dans des conditions de ciel clair :

$$R_{diff} = R_{out} * (0.271 - 0.294 * \tau^M) * \sin \alpha \quad (10)$$

Le rayonnement réfléchi est calculé à partir de la formule de Gate (Gates, 1980) :

$$R_{ref} = r * S_c * (0.271 + 0.706 \tau^M) * \sin \alpha * \sin^2 (\chi/2)$$

r étant la réflectance du sol (nous avons utilisé une valeur constante de 0.2).

La somme des trois composantes permet d'estimer le rayonnement global (R_{tot}) pour chaque heure de calcul (W/m²) :

$$\mathbf{R_{tot} = R_{dir} + R_{diff} + R_{ref}}$$

Les valeurs journalières de rayonnement global sont obtenues en faisant la somme des valeurs horaires entre le lever et le coucher du soleil.

Les conditions nuageuses (Dubayah, 1997; Hofierka, 2002) sont calculées en utilisant le "cloud attenuation factor" (K_c) défini par Kasten and Czeplak (1980). Cette équation ne nécessite que des valeurs mesurées en octas comme on les trouve généralement dans les postes météo, un octa représentant 1/8 du ciel visible. Nous avons interpolé 30 ans de mesures sur 87 stations de Météo France utilisant la méthode IDW. Le rayonnement solaire avec ciel nuageux (R_{totc}) est ensuite calculé :

$$R_{totc} = R_{tot} * K_c$$

avec $K_c = (1 - 0.75(N/8)^{3.4})$
N étant la nébulosité en octas

Le rayonnement global peut être calculé pour des durées allant d'un jour à un an, par sommation des valeurs journalières pendant la période considérée. Afin d'économiser du temps de calcul, il est possible de calculer une valeur mensuelle en extrapolant un nombre limité de jours de calcul.

2) Calcul à l'échelle de la France

L'utilisation du SIG permet d'obtenir en sortie une matrice de pixels de 50 mètres de coté, couvrant toute la France ; chaque pixel contenant une valeur de rayonnement pour chaque mois de l'année. Le format numérique de ces données et leur fine résolution permet au forestier de terrain, ou qu'il se trouve en France, de pouvoir appréhender la variabilité spatiale du rayonnement solaire à l'échelle de la forêt (**Figure 4**).

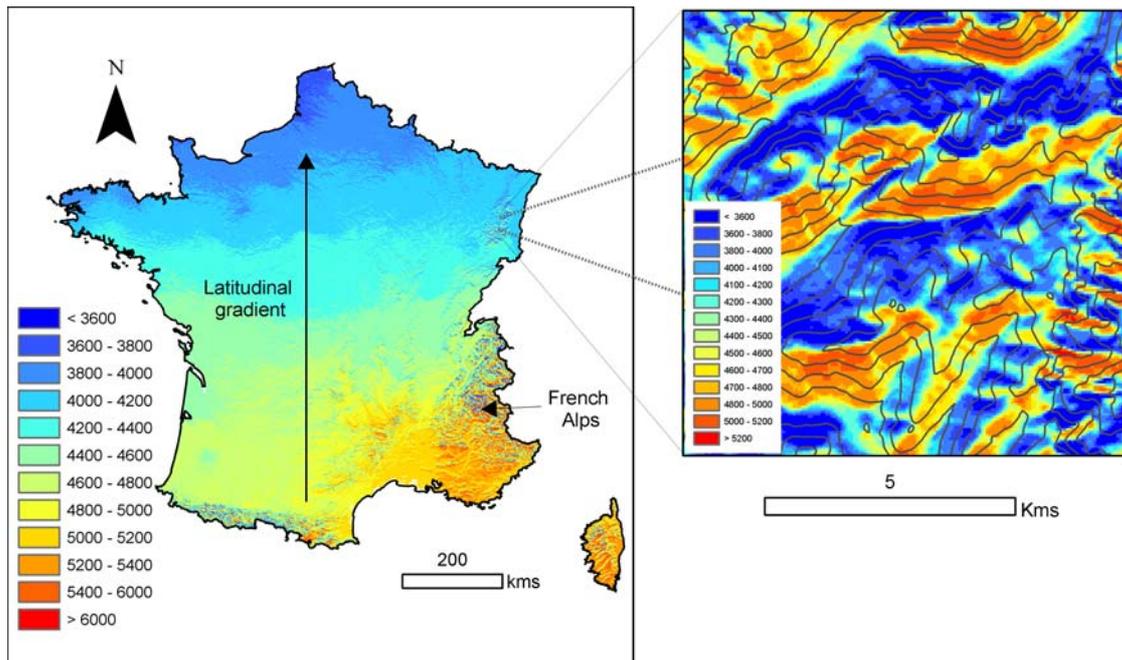


Figure 4. Rayonnement solaire global annuel sur la France entière. Le zoom sur le bassin versant de Cornimont (Vosges) montre la variabilité spatiale du calcul à petite échelle (valeurs en MJ/m²).

Nous obtenons des valeurs annuelles variant entre 1200 et 7200 MJ/m² pour la France, pour une valeur moyenne approchant 4500 MJ/m². Le gradient latitudinal est visible, tout comme la forte variabilité due à la topographie, que l'on peut observer sur la **Figure 4** dans le bassin versant de Cornimont (Massif Vosgien). On observe que l'écart de rayonnement entre deux versants pentus dans les Alpes est relativement identique à l'écart de rayonnement sur terrain plat entre le nord et le sud de la France. La différence de rayonnement entre le bassin méditerranéen et la cote landaise, à latitude égale, ressort assez nettement.

3) Validation du modèle Helios

Le modèle Helios est validé en comparant les données de rayonnement estimées à celles mesurées sur les postes de Météo France. Pour cela, nous avons acquis les données décennales de 88 postes climatiques possédant des séries d'enregistrement suffisamment longues. Nous n'avons ainsi conservé que les stations qui au moins 5 années d'enregistrement pour chacune des décades concernées par la période 1971-2002. Les données décennales ont ensuite été agrégées par mois afin de pouvoir les comparer aux données mensuelles du modèle Helios.

La validation montre une forte corrélation entre Helios et Météo France ($R^2 = 0,78$ sur les valeurs annuelles), avec un biais annuel inférieur à 1% (36,9 MJ/m²) et une erreur moyenne absolue de 194,5 MJ/m² (pour une valeur moyenne de 4450 MJ/m²) (**Figure 15**). Le modèle Hélios surestime légèrement le rayonnement en été et le sous-estime en hiver. Les mois les mieux corrélés avec les postes Météo-France sont ceux de décembre et janvier ($R^2 = 0,88$) ; le moins bon étant celui de mai ($R^2 = 0,60$) (**Tableau 9**).

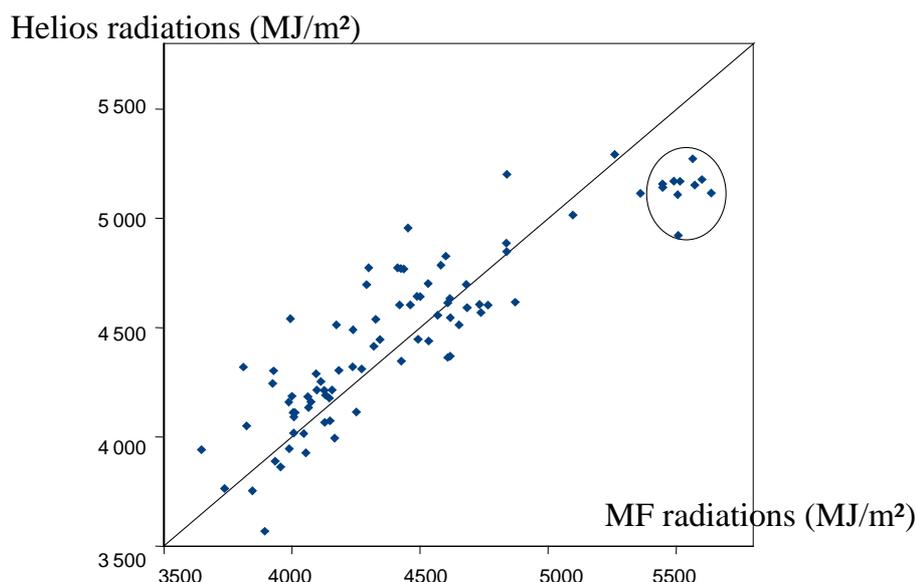


Figure 15. Comparaison des valeurs de rayonnement annuelles calculées avec Hélios et les mesures de Météo France (MF) (MJ/m²) (moyenne 1961-1990 ; 88 postes)

	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct	Nov.	Dec.	Annee
MF	128.7	190.9	350.1	454.8	582.6	619.3	648.5	571.6	397.4	253.9	147.0	105.4	4450.2
Helios	111.7	174.0	336.9	467.6	606.0	661.2	681.5	580.5	401.7	239.8	128.9	91.5	4481.2
biais	-17.0	-16,9	-13.2	12.8	23.4	41.9	33	8.9	4.3	-14.1	-18.1	-13.9	30.9
R ²	0.88	0.84	0.81	0.60	0.60	0.62	0.68	0.65	0.72	0.78	0.84	0.88	0.78

Tableau 9. Corrélations entre les valeurs moyennes mensuelles calculées avec Hélios et les mesures de Météo France (MF) (MJ/m²) (moyenne 1961-1990 ; 88 postes).

3.1.1 Sensibilité du modèle Helios

Nous avons étudié la sensibilité du modèle selon différentes conditions de pente, d'altitude, d'exposition, et de nébulosité. Pour cela nous avons travaillé à trois différentes échelles emboîtées : la France entière (540000 km²), la région Lorraine (24000 km²), et le bassin versant de Cornimont situé dans les montagnes Vosgiennes, entre Epinal et Colmar (2.4 km²). Pour chacun de ces sites, nous avons calculé la variabilité du rayonnement solaire en prenant les valeurs moyennes pour chacune des variables testées (pente, exposition, altitude, latitude, nébulosité), sauf pour celles dont on veut tester le comportement dont on a fait varier les valeurs entre les valeurs extrêmes présentes sur le site, selon un intervalle défini. Par exemple, pour étudier l'effet de la latitude à l'échelle de la France, nous avons pris les valeurs moyennes de pente, d'exposition, d'altitude et de nébulosité calculées sur la France, et fait varier la latitude entre 41° et 51°, par étapes de 1°. Ces valeurs correspondent aux latitudes minimales et maximales rencontrées en France. Pour l'altitude, le test a été limité à 3000 m, qui représente la limite supérieure de végétation.

L'analyse approfondie de la sensibilité du modèle montre qu'une augmentation de latitude ou de la nébulosité entraîne une diminution du rayonnement global, tandis qu'une augmentation d'altitude et une pente croissante orientée au sud induisent une augmentation des radiations (**Figure 5**). La prise en compte de la nébulosité est particulièrement importante. Ainsi, la corrélation entre les postes Météo-France et le modèle passe de 0,78 à 0,46 pour l'année (de 0.62 à 0.02 pour le mois de juin) si on exclut la couverture nuageuse (**Figure 6**). Cependant, les valeurs de rayonnement ne sont pas dépendantes des mêmes paramètres selon la taille de la zone étudiée (**Tableau 2**). A l'échelle locale, la pente, l'exposition et, dans une moindre mesure, l'altitude, jouent un rôle essentiel. A l'échelle nationale, la latitude et la nébulosité deviennent prépondérantes, confirmant ainsi l'importance d'un modèle prenant en compte la totalité de ces paramètres. On peut estimer qu'au-delà d'un secteur d'étude ayant la taille d'une région, l'utilisation d'un modèle radiatif qui ne prend pas en considération les variations de latitude et de nébulosité entraîne d'importantes erreurs.

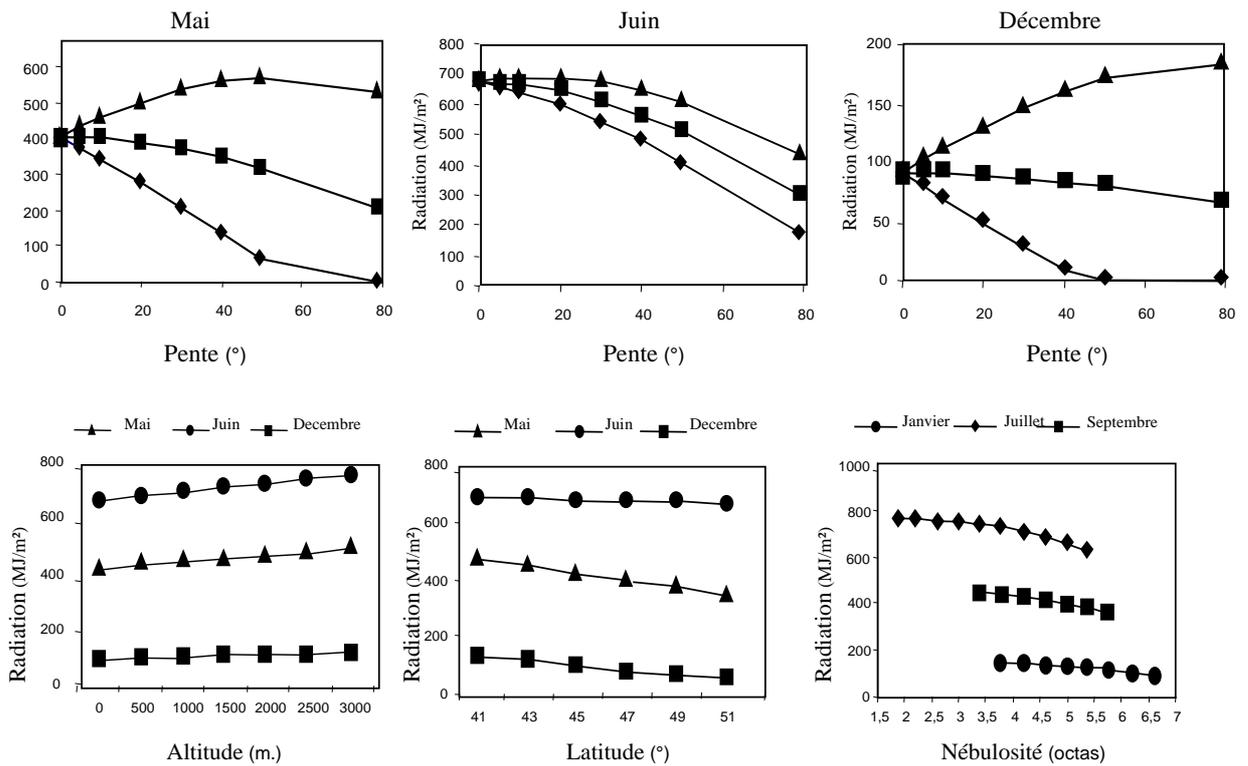


Figure 5. Variations de rayonnement solaire en fonction de l'altitude, de la latitude, et de la nébulosité (MJ/m²)

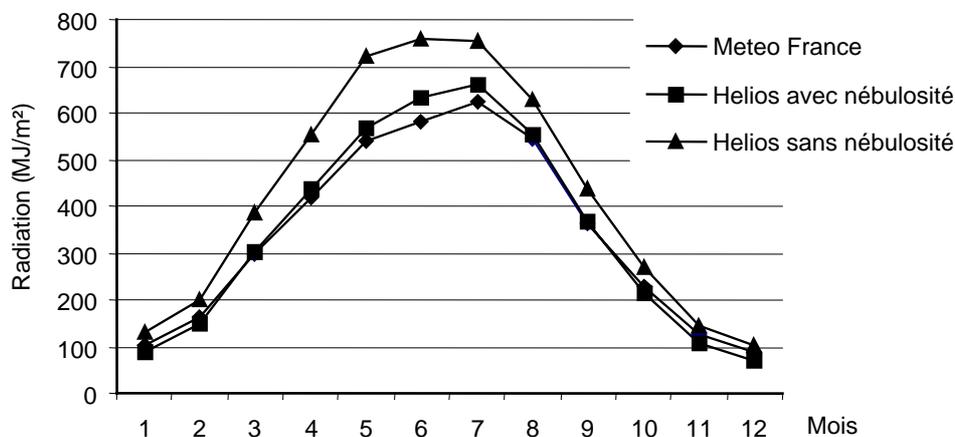


Figure 6. Rayonnement calculé par Helios avec et sans nébulosité pour le poste météo de Luxeuil (moyenne 1961-1990).

	France (540 000 km ²)			Lorraine (24 000 km ²)			Cornimont (2,4 km ²)		
	mai	juin	déc.	mai	juin	déc.	mai	juin	déc.
Alt. limitée à 3000 m	77	90	25	23	37	7	21	34	8
Nébulosité	106	152	45	5	8	5	0	0	0
Latitude	209	46	115	9	7	1	0	0	0
Expo. avec pente 5°	59	24	22	35	24	14	48	29	18
Expo. avec pente 10°	114	46	41	87	50	29	95	58	37
Expo. avec pente 20°	224	91	81	172	98	57	187	115	72
Expo. avec pente 40°	944	170	153	323	185	106	N	N	N

Tableau 2. Amplitude des radiations du modèle Hélios (MJ/m²) obtenues en faisant varier les valeurs des paramètres entre leurs deux extrêmes sur trois sites d'étude de taille décroissante. L'altitude maximale est celle de la limite de végétation (estimée à 3000 m) et la pente maximale testée est de 40°. N = non observé.

4) Comparaison entre différentes méthodes d'estimation du rayonnement solaire

La méthode la plus simple utilisée par les chercheurs pour estimer le rayonnement solaire est de les dériver à partir de valeurs de pentes ou d'exposition. Ces variables sont souvent utilisées car elles sont faciles à mesurer sur le terrain ou à calculer (Carroll et al., 1999; Clark et al., 1999). L'exposition étant une variable circulaire, les écologues calculent leur sinus ou leur cosinus afin d'obtenir une variable traduisant un gradient. D'autre part, depuis le développement des SIG dans les années 1990, différents modèles radiatifs ont été réalisés et sont utilisés dans de nombreuses études écologiques. Ils sont plus ou moins sophistiqués et faciles à mettre en œuvre, la plupart d'entre eux n'étant pas conçus pour travailler sur de larges emprises du fait de la non prise en compte des variations de latitude ou de nébulosité.

L'efficacité de ces différentes méthodes de calcul n'a jamais été comparée, bien qu'elles soient couramment utilisées. De nombreux modèles permettent un calcul sous ciel clair, mais l'effet de la nébulosité sur la qualité de la simulation du rayonnement, et sa capacité à prédire la ressource forestière, semblent n'avoir jamais été évalués. Aussi, notre objectif est de comparer 5 méthodes de calcul, la dérivation du sinus et le cosinus de la pente, l'interaction entre la pente et le cosinus de l'exposition, et le rayonnement solaire calculé sans et avec nébulosité. Ces deux derniers calculs seront réalisés à l'aide du programme Helios.

Pour comparer l'effet de ces 5 estimations, nous avons choisi dans un premier temps de valider les calculs avec le jeu de 88 postes météo France décrit précédemment. Dans un deuxième temps nous comparerons leur capacité prédictive vis-à-vis de trois essences forestières.

41) Calcul et validation des indices

Le sinus et le cosinus de la pente, l'interaction entre la pente et le cosinus de l'exposition, et le rayonnement solaire calculé sans et avec nébulosité ont été calculés par pixels de 50 mètres de côté sur toute la France (**Figure 23**).

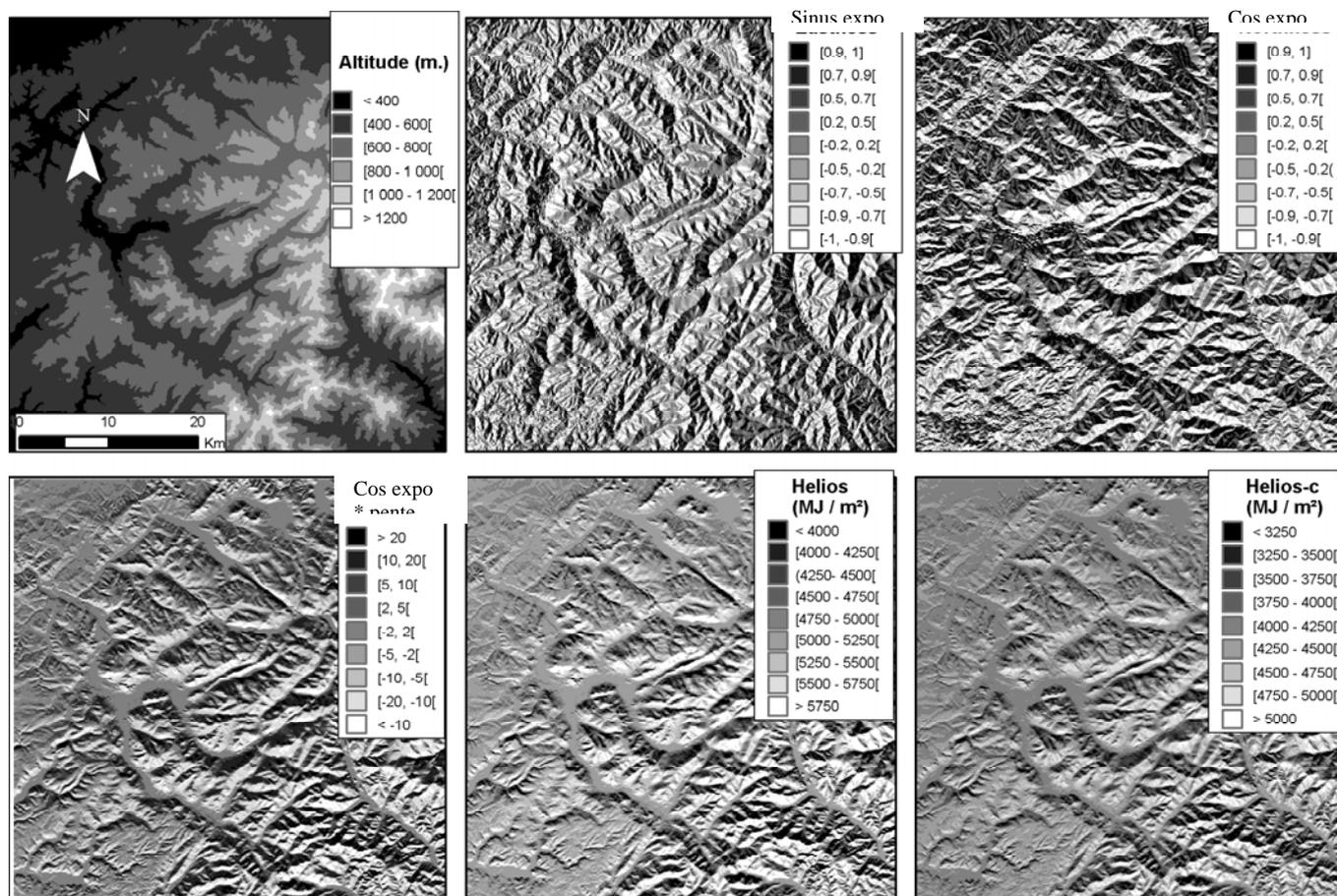


Figure 23. Extrait des cartes nationales centrées sur le sud des montagnes Vosgiennes (6°30'' longitude et 48° latitude) montrant les différences entre les indices de rayonnement solaire en terrain montagneux. Les calculs du sinus, du cosinus de l'exposition, l'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente, le rayonnement sans nébulosité (Helios) et avec nébulosité calculés avec Helios (Helios-c) ont été cartographiés.

A l'échelle de la France, les cartes de rayonnement solaire avec et sans nébulosité montrent des différences à la fois en terme de valeurs et de répartition spatiale. En effet, si le rayonnement solaire calculé sans nébulosité (appelé Helios) varie entre 1400 et 8000 MJ/m², avec une valeur moyenne de 5200 MJ/m², les valeurs calculées avec la nébulosité (Helios-c) sont naturellement plus basses, s'échelonnant entre 1200 et 7200 MJ/m² avec une valeur moyenne de 4500 MJ/m². L'effet de la nébulosité accentue les différences nord/sud et introduit des différences est/ouest (**Figure 24**). Par exemple, sont mis en évidence des climats régionaux comme la Provence qui présente de fort taux d'insolation (zone notée A dans la carte Helios-c), que l'on peut comparer à une insolation relativement plus basse dans le pays basque, à une latitude identique (notée B).

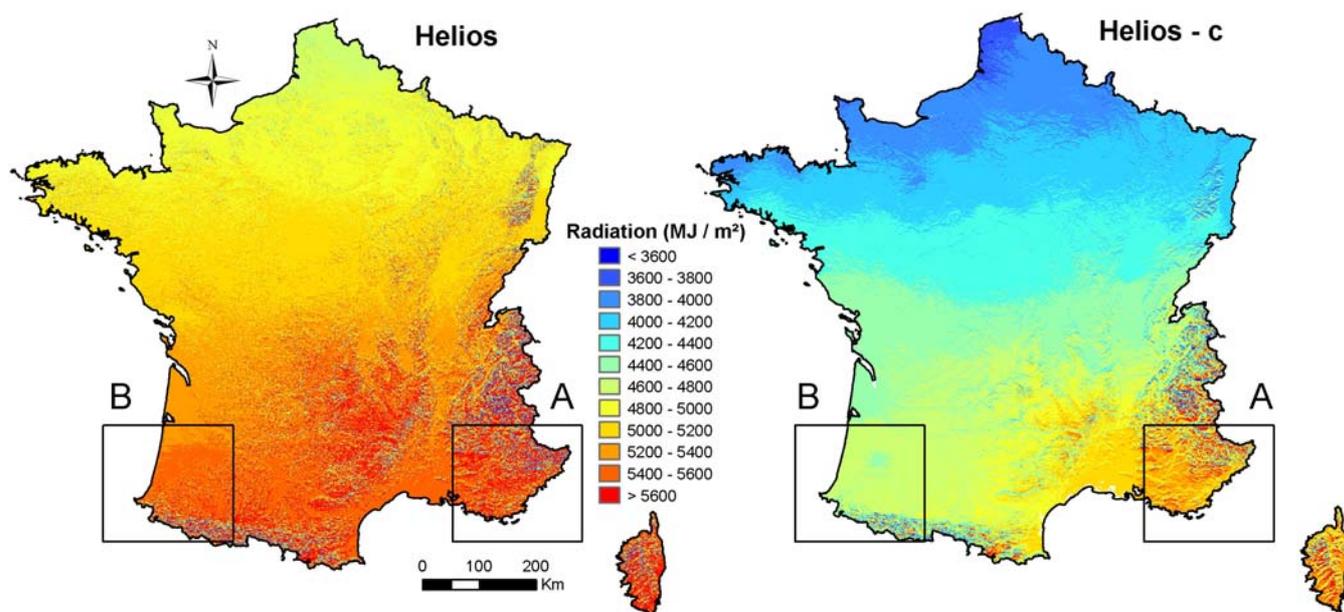


Figure 24. Rayonnement solaire annuel en France, calcul sous ciel clair (Helios) et ciel nuageux (Helios-c) (MJ/m²). A : Provence avec un fort rayonnement, B: Pays Basque à la même latitude et avec un rayonnement plus faible avec Helios-c.

En comparant les différentes estimations aux 88 postes Météo France, on s'aperçoit que les résultats sont très différents selon la méthode utilisée (**Tableau 14**). Les dérivées de l'exposition, qu'elles soient couplées ou non avec la pente, sont très peu corrélées aux mesures de Météo France ($R^2 < 0.02$). Le rayonnement solaire calculé sans nébulosité montre une meilleure corrélation, mais nettement inférieure à celle du modèle sous ciel nuageux (R^2 0.78 contre 0.46 pour le modèle sous ciel clair) (**Figure 25**).

	Jan.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Année
Sinus expo	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00
Cos expo	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cosexpo * pte	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Helios	0,72	0,62	0,53	0,29	0,01	0,00	0,12	0,25	0,46	0,58	0,68	0,76	0,46
Helios-c	0,88	0,84	0,81	0,60	0,60	0,62	0,68	0,65	0,72	0,78	0,84	0,88	0,78

Tableau 14. Coefficient de corrélation (R^2) entre le rayonnement solaire mesuré (88 postes Météo France) et les 5 estimations du rayonnement : sinus, cosinus de l'exposition, interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente, le rayonnement sans nébulosité (Helios) et avec nébulosité calculés avec Helios (helios-c).

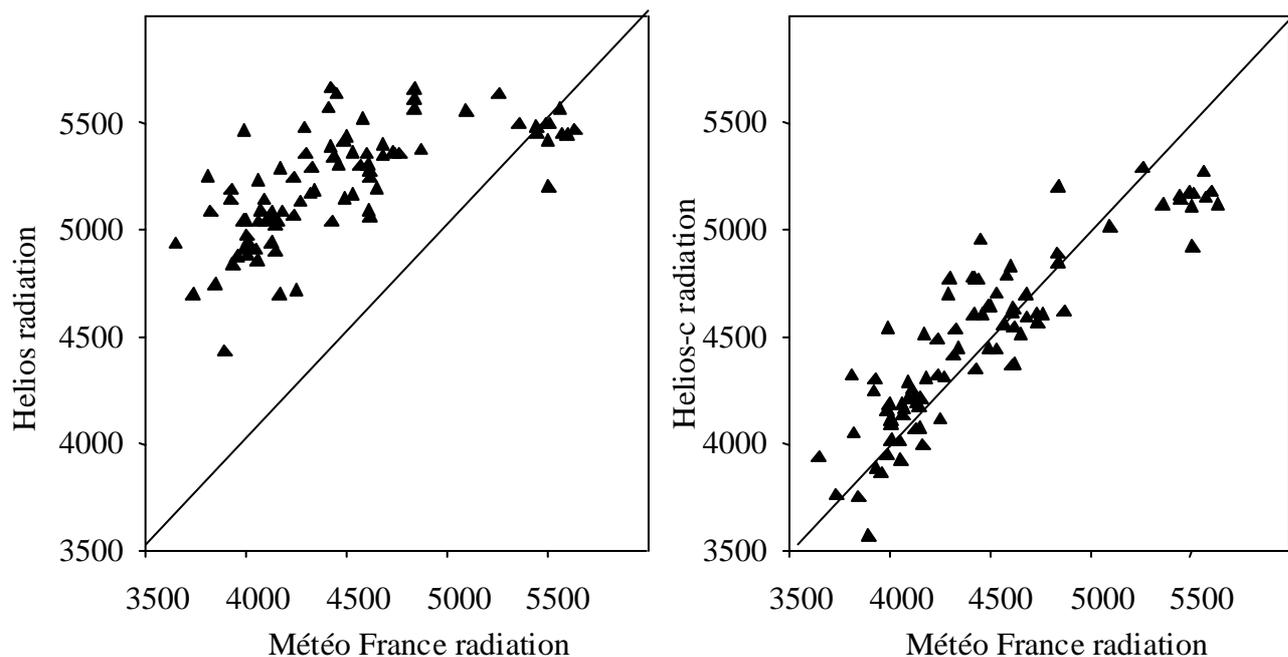


Figure 25. Corrélation entre le rayonnement solaire annuel mesuré sur les postes de Météo France des valeurs annuelles d' Helios nébulosité (A) et avec (B) (MJ/m²).

42) Effet des indices sur la distribution des espèces

La réalisation de modèles univariés par régression logistique entre les indices de rayonnement solaire et *Acer pseudoplatanus*, *Abies alba* ou *Quercus pubescens* montrent que les indices basés sur le calcul d'exposition (sinus, cosinus, interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente) ne sont pas très efficaces pour prédire la distribution de ces espèces à l'échelle de la France (**Figure 26**).

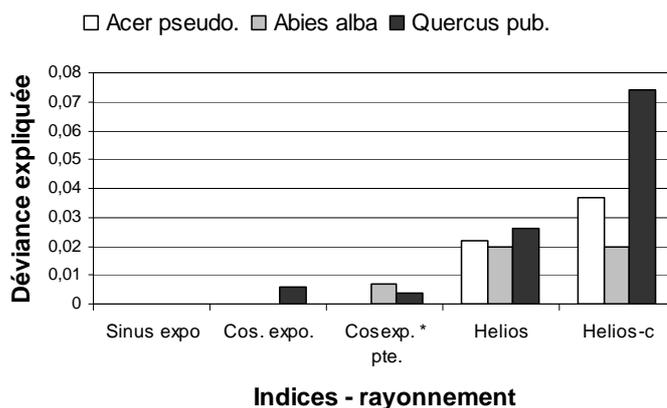


Figure 26. Part de déviance expliquée (D^2) pour les modèles univariés de distribution d'*Acer* campestre, *Abies alba* et *Quercus pubescens* ($n = 6219$). Le sinus de l'exposition, le cosinus de l'exposition, l'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente, le rayonnement solaire sans (Helios) et avec nébulosité sont comparés.

L'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente, qui explique une petite part de la déviance de *Abies alba* et *Quercus pubescens*, est le meilleur de ces trois indices, mais il explique une part de déviance bien moindre que le modèle SIG. La plus forte capacité prédictive de la distribution d'*Acer pseudoplatanus* ($D^2 = 0.037$) et de la distribution de *Quercus pubescens* est observée avec Helios-c ($D^2 = 0.074$, **Figure 26**). Pour *Abies alba*, la déviance expliquée en utilisant le rayonnement solaire est identique si on prend en compte ou pas la nébulosité ($D^2 = 0.020$).

Les différents indices permettant d'estimer le rayonnement solaire ont ensuite été utilisés en combinaison avec d'autres variables écologiques pour prédire la distribution des espèces. Plusieurs variables candidates ont été testées (précipitations moyennes annuelles, MaP, températures moyennes annuelles, MaT, altitude et pH). Un modèle a été réalisé sans estimateur du rayonnement solaire, ce sera le modèle « étalon », et ensuite 5 nouveaux modèles ont été réalisés en incluant les indices de rayonnement l'un après l'autre comme variables candidates. En ce qui concerne le rayonnement solaire calculé avec Helios, nous avons choisi de tester le rayonnement annuel ainsi que les valeurs mensuelles de juin et de décembre.

Les modèles multivariés intégrant un à un les estimateurs du rayonnement montrent que les indices dérivés de l'exposition ont un effet très faible sur la distribution des espèces étudiées, généralement non significatif, sauf pour *Quercus pubescens* et *Abies alba*, pour lesquels respectivement le cosinus de l'exposition et l'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente augmente légèrement la déviance expliquée (**Figure 28**). Pour les trois espèces étudiées, le modèle Helios, avec ou sans nébulosité, donne de meilleurs résultats que les autres indices ($p < 0.001$). Le calcul prenant en compte la nébulosité (Helios-c) donne dans tous les cas de meilleures performances que le modèle sous ciel clair. Le fait d'avoir une valeur de rayonnement mensuel calculé avec nébulosité dans le modèle permet une augmentation significative de D^2 , de 0.184 à 0.221 pour *Acer pseudoplatanus*, 0.332 à 0.355 pour *Abies alba*, et de 0.341 à 0.355 pour *Quercus pubescens*.

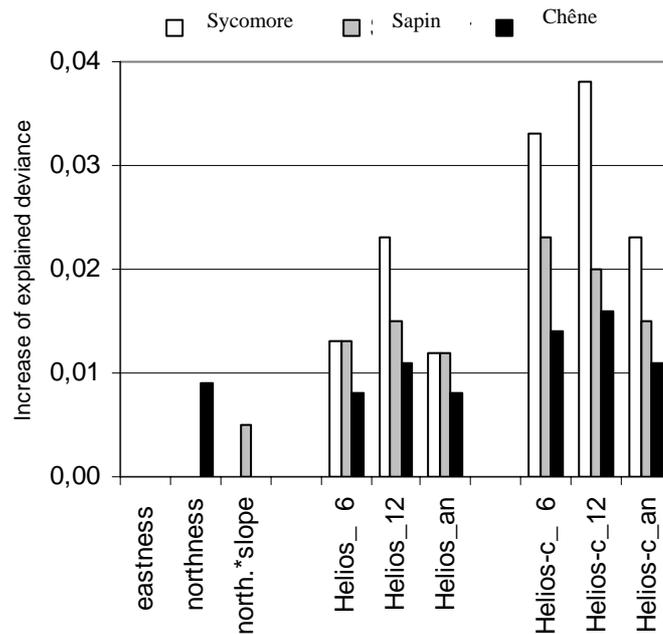


Figure 28. Augmentation de la variance expliquée pour les modèles de distribution d'*Acer pseudoplatanus*, d'*Abies alba* et *Quercus pubescens*, en incluant alternativement une des estimations étudiées de rayonnement solaire, comparativement au modèle de référence qui ne prend pas en compte le rayonnement solaire. Ce modèle de référence a comme variables candidates l'altitude, les températures moyennes annuelles, les précipitations et le pH des sols. Les estimateurs du rayonnement solaire testés sont le cosinus de l'exposition, son sinus, l'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente, et le calcul SIG du rayonnement solaire sans nébulosité (Helios) et avec (Helios-c) pour juin (suffixe 6, décembre (suffixe 12), et l'année entière (suffixe an).

43) Conclusion

Nos résultats montrent que le choix des estimateurs de rayonnement solaire est important et que les résultats peuvent varier de façon importante selon la méthode de calcul choisie. Les calculs de sinus, cosinus de l'exposition avec ou sans interaction avec la pente ne sont pas efficaces ni pour estimer le rayonnement solaire ni pour prédire la distribution des trois espèces étudiées à l'échelle de la France. Cela est probablement dû à la grande taille du site d'étude. En effet, il y a de ce fait une large amplitude des latitudes, permettant d'avoir une valeur de rayonnement identique dans les pentes nord du sud de la France et dans les pentes sud du nord de la France. Le fait d'inclure les précipitations et les températures dans les modèles de distribution des espèces élimine cet effet latitudinal mais, même dans ce cas, ces indices ont un pouvoir prédictif très faible.

Les valeurs de rayonnement calculées avec un modèle SIG donnent de bien meilleurs résultats, mais des différences importantes apparaissent selon la méthode de calcul utilisée. Ainsi, il apparaît essentiel de prendre en compte l'action de la nébulosité. Cela est particulièrement vrai au printemps et en été, le modèle réalisé sous ciel clair n'étant plus corrélé avec les mesures météo en mai ou juin. Cela peut s'expliquer par la faible variabilité du rayonnement solaire à cette époque ou le soleil est haut dans le ciel, et par la haute variabilité de la nébulosité pour cette même époque. Ces résultats justifient de déconseiller l'usage de modèles ne prenant pas en compte la couverture nuageuse à l'échelle d'un pays comme la France.