

Chapitre 4

Techniques numériques d'estimation de la distribution spectrale du rayonnement solaire

Sommaire

4.1	Techniques mathématiques exploitant les estimations de l'approche de Kato et al. (1999)	55
4.1.1	Technique de sommation pondérée	56
4.1.2	Une autre définition des poids γ_j	57
4.1.3	Technique de ré-échantillonnage	57
4.2	Validation numérique des techniques développées	64
4.2.1	Performance des techniques pour l'estimation des éclairagements dans les bandes spectrales particulières UV et PAR	64
4.2.2	Performance de la technique de ré-échantillonnage pour l'estimation de la densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD) et l'éclairement lumineux	66
4.3	Conclusion	66

Nous avons vu que l'approche de [Kato et al. \(1999\)](#) améliorée produit une description plutôt précise de la distribution spectrale sur 32 bandes spectrales. De manière générale, nous voulons produire des estimations dans n'importe quelle bande spectrale particulière. Peut-on trouver des techniques numériques permettant d'estimer l'éclairement dans n'importe quel intervalle spectral, voire une distribution spectrale fine sur l'ensemble du spectre, en partant d'une représentation discrète d'éclairéments intégrés dans 32 bandes ?

Le domaine de définition pour une bande spectrale particulière ne coïncide généralement pas avec le groupement de deux ou plusieurs des 32 KB. Cette non-coïncidence est illustrée par la figure 4.1 pour deux bandes spectrales particulières : UV [280, 400] nm, et PAR [400, 700] nm. On peut observer de cette illustration que pour couvrir, par exemple, le domaine spectral du PAR, les KB allant de # 6 au # 16 sont nécessaires. Cependant, il existe un chevauchement au niveau des KB extrêmes # 6 et # 16. Quelle technique faut-il appliquer pour produire une estimation précise de l'éclairement PAR ? On pourrait, par exemple, associer des poids à chaque KB pour tenir compte des chevauchements afin d'effectuer une sommation discrète.

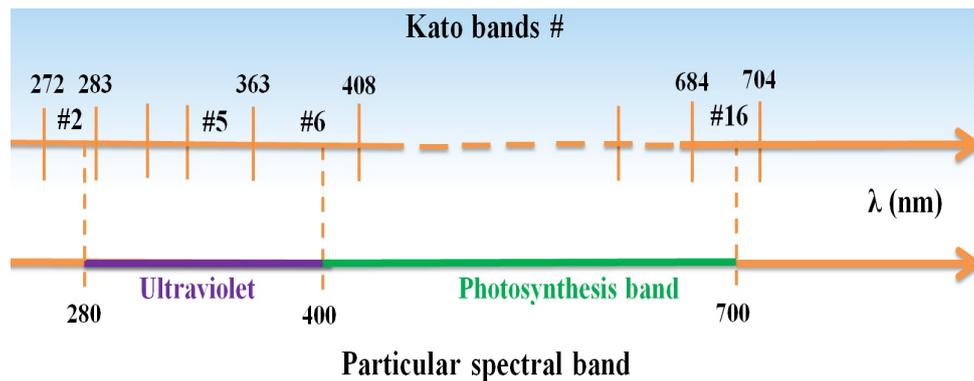


FIGURE 4.1 – Répartition spectrale des bandes Kato et des bandes spectrales UV et PAR.

D'autres grandeurs physiques liées à la distribution spectrale du rayonnement solaire sont par exemple, l'efficacité lumineuse pour la lumière du jour, la densité de photons photosynthétiquement actifs pour la photosynthèse des plantes (en anglais photosynthetic photon flux density, PPFD), ou encore la densité de courant pour les cellules photovoltaïques. Elles sont obtenues par multiplication de l'éclairement spectral solaire par une réponse spectrale.

La figure 4.2 montre les réponses spectrales normalisées associées à la photosynthèse des plantes, l'oeil, la peau humaine et un type de cellule photovoltaïque. Elles peuvent être simples : fonction linéaire pour la photosynthèse des plantes, ou plus complexes, comme la réponse spectrale de la cellule photovoltaïque.

La réponse spectrale varie grandement en fonction de la longueur d'onde. Dans l'approche de [Kato et al. \(1999\)](#), une seule estimation d'éclairement est faite en moyenne

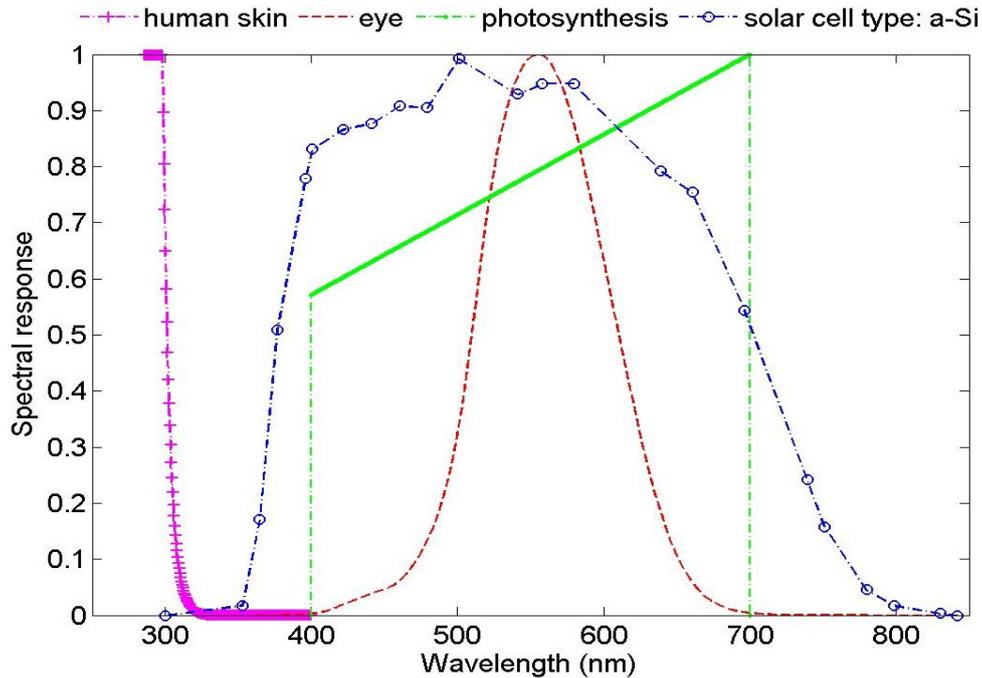


FIGURE 4.2 – Exemples de réponses spectrales : cellule photovoltaïque a-Si, œil, photosynthèse, peau humaine (CIE, 2; Kleissl, 2013; McKinlay *et al.*, 1987).

toutes les 30 nm, et intégrée sur ces 30 nm. Cette unique estimation est-elle suffisante pour y associer une réponse spectrale grandement variable avec la longueur d’onde ? Une réponse possible serait de développer une technique permettant d’obtenir des estimations à plus haute résolution spectrale par exemple tous les 1 nm. La multiplication avec une réponse spectrale quelconque deviendrait alors aisée.

C’est ainsi que dans ce chapitre, nous présentons deux principales techniques, chacune d’elles répondant à une des deux questions posées à savoir : est-il possible d’utiliser cette représentation discrète en 32 KB de la distribution spectrale pour estimer l’éclairement sur un intervalle quelconque ? et Est-il possible d’intégrer à la méthode, la réponse spectrale d’un instrument, d’un système, de l’œil humain pour estimer l’éclairement ”utilisable” par l’instrument, par le système ou par l’œil humain ? Les deux techniques exploitent en entrées les estimations de l’approche de Kato *et al.* (1999) et permettent de produire des grandeurs physiques relatives à la distribution spectrale du rayonnement solaire dans n’importe quelle bande spectrale particulière. Dans la suite, nous évaluons numériquement leur performance par comparaison des estimations de référence faites par les calculs spectraux détaillés du MTR libRadtran.

La première technique répondant à la première question, sera destinée à l’estimation de l’éclairement UV et PAR. Elle consistera à ajuster les éclairements des KB concernés par le chevauchement de manière à estimer précisément l’éclairement UV. Nous l’appellerons technique de sommation pondérée.

La deuxième technique répondant à la deuxième question, permettra de produire plus

finement l'éclairement solaire, à 1 nm de résolution si possible, en exploitant toujours les estimations de l'approche de [Kato *et al.* \(1999\)](#). Nous l'appellerons technique de ré-échantillonnage de l'éclairement solaire. Il est clair qu'une telle technique offre la possibilité d'estimer l'éclairement dans n'importe quel intervalle donné, et donc de retrouver les résultats de la technique de sommation pondérée. Nous avons décidé d'étudier les deux techniques car leur usage opérationnel peut différer.

4.1 Techniques mathématiques exploitant les estimations de l'approche de [Kato *et al.* \(1999\)](#)

De manière générale, l'éclairement global dans une bande spectrale particulière (BSP) G_{bsp} est défini comme :

$$G_{bsp} = \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} G_{\lambda} d\lambda \quad (4.1)$$

où λ_{inf} et λ_{sup} sont respectivement les longueurs d'onde inférieure et supérieure définissant la bande spectrale particulière. Soit, B_{bsp} l'éclairement direct dans une BSP :

$$B_{bsp} = \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} B_{\lambda} d\lambda \quad (4.2)$$

L'éclairement global QG_{bsp} pour une BSP est :

$$QG_{bsp} = \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} G_{\lambda} RS_{\lambda} d\lambda \quad (4.3)$$

avec RS_{λ} , la réponse spectrale de la matière qui reçoit le rayonnement solaire, comme illustrée en figure [4.2](#). De même, l'éclairement direct QB_{bsp} pour une BSP est :

$$QB_{bsp} = \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} B_{\lambda} RS_{\lambda} d\lambda \quad (4.4)$$

L'équation [\(4.3\)](#), respectivement [\(4.2\)](#), est équivalente à l'équation [\(4.1\)](#), respectivement [\(4.4\)](#), lorsque la réponse spectrale vaut l'unité. Nous avons omis la composante diffuse des estimations car elle s'obtient par différence entre l'éclairement global et l'éclairement direct.

L'intégrale de l'équation [\(4.3\)](#) peut être remplacée par une somme de Riemann sur des petits intervalles spectraux ou bandes $\delta\lambda = 1$ nm, plus tard appelés NB. Nous supposons que les propriétés optiques de l'atmosphère y sont quasiment constantes. Si G_{NB_j} et RS_{NB_j} dénotent respectivement l'éclairement global et la réponse spectrale moyenne dans la $j^{\text{ème}}$

NB, l'équation (4.3) devient :

$$QG_{bsp} = \sum_{j=1}^n G_{NB_j} RS_{NB_j} \quad (4.5)$$

où n représente le nombre d'intervalles $\delta\lambda$ se trouvant dans la bande spectrale particulière étudiée, . Cette réponse spectrale moyenne est estimée une fois pour toute et est indépendante de l'état atmosphérique. Une équation similaire peut aussi être posée pour l'éclairement direct.

4.1.1 Technique de sommation pondérée

Si k définit le nombre de KB couvrant le domaine spectral de la bande spectrale particulière, nous pouvons appliquer la somme de Riemann sur les k KB au lieu des n NB. Il y a par exemple, 11 KB pour le PAR et 6 KB pour l'ultraviolet. Certaines KB sont partiellement hors du domaine de la bande spectrale particulière. C'est par exemple, le cas des KB # 6 et # 16 pour le PAR (voir Fig 4.1). Pour tenir compte de la coïncidence partielle, une solution est d'associer à chaque KB une fonction poids γ_j , définie par exemple comme suit :

$$\gamma_j = \frac{\Delta[(KB_j) \cap (BSP)]}{\Delta KB_j} \quad (4.6)$$

Le tableau 4.1 donne pour l'ultraviolet, la lumière du jour et la bande liée à la photosynthèse des plantes, les poids γ_j associés à chaque KB pour effectuer la sommation pondérée.

TABLEAU 4.1 – Poids à associer à chaque estimation des KB pour la sommation pondérée dans les bandes spectrales particulières (BSP).

BSP intervalle (nm)	ultraviolet [280, 400]	lumière du jour [380, 780]	photosynthèse [400, 700]
Poids $\gamma_j =$	$\begin{cases} 1; \#4 \text{ au } \#5 \\ \frac{283-280}{283-272} = 0,27; \#3 \\ \frac{400-363}{408-363} = 0,82; \#6 \\ 0; \text{ailleurs} \end{cases}$	$\begin{cases} 1; \#7 \text{ au } \#17 \\ \frac{408-380}{408-363} = 0,44; \#6 \\ \frac{780-743}{791-743} = 0,77; \#18 \\ 0; \text{ailleurs} \end{cases}$	$\begin{cases} 1; \#7 \text{ au } \#15 \\ \frac{408-400}{408-363} = 0,18; \#6 \\ \frac{700-684}{704-684} = 0,8; \#16 \\ 0; \text{ailleurs} \end{cases}$

Si c_1 et c_2 sont les numéros de KB extrêmes, l'éclairement global dans une bande spectrale particulière s'écrit comme :

$$QG_{bsp} = \sum_{j=c_1}^{c_2} \gamma_j G_{KB_j} RS_{KB_j} \quad (4.7)$$

avec G_{KB_j} est l'éclairement global et RS_{KB_j} la réponse spectrale moyenne pour KB_j . Une équation similaire est obtenue en éclairage direct.

4.1.2 Une autre définition des poids γ_j

La définition des poids γ_j précédemment présentée est fondée sur le recouvrement spectral. De manière peut-être plus réaliste, la pondération peut être définie en fonction de l'éclairement spectral au sommet de l'atmosphère. Dans ce cas, le poids est la proportion d'éclairement au sommet de l'atmosphère se trouvant dans la bande $(KB_j) \cap (BSP)$ par rapport à l'éclairement au sommet de l'atmosphère dans KB_j :

$$\gamma_j = \frac{I_{O(KB_j) \cap (BSP)}}{I_{OKB_j}} \quad (4.8)$$

Le tableau 4.2 présente les valeurs numériques des nouveaux poids. On peut observer que ces valeurs diffèrent très peu, de 0,07 au maximum, des poids listés dans le tableau 4.1. Ces valeurs de γ_j sont utilisées dans l'équation (4.7) pour calculer l'éclairement global au sol QG_{bsp} .

TABLEAU 4.2 – Poids à associer à chaque éclairage des KB pour la sommation pondérée définie par rapport à la proportion de l'éclairement hors atmosphère.

BSP intervalle (nm)	ultraviolet [280, 400]	lumière du jour [380, 780]	photosynthèse [400, 700]
Poids $\gamma_j =$	$\left\{ \begin{array}{l} 1; \#4 \text{ au } \#5 \\ 0,32; \#3 \\ 0,75; \#6 \\ 0; \text{ailleurs} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1; \#7 \text{ au } \#17 \\ 0,40; \#6 \\ 0,78; \#18 \\ 0; \text{ailleurs} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1; \#7 \text{ au } \#15 \\ 0,25; \#6 \\ 0,80; \#16 \\ 0; \text{ailleurs} \end{array} \right.$

Les deux définitions des fonctions poids aboutissent à des valeurs très proches. Ce n'est pas une surprise. En effet, les bandes Kato ont été définies de manière à ce que l'éclairement hors atmosphère soit assez constant à l'intérieur de chaque bande. Il s'ensuit que la pondération par recouvrement spectral est *de facto* proche de celle par proportion de l'éclairement hors atmosphère. On peut ainsi admettre à avoir des résultats très proches en ce qui concerne les éclairagements au sol.

4.1.3 Technique de ré-échantillonnage

La largeur des bandes KB est supérieure à 30 nm, ce qui est grand pour effectuer des opérations avec des réponses spectrales telles que mentionnées en début de chapitre.

Nous nous proposons d'effectuer un ré-échantillonnage des KB en plusieurs petites bandes spectrales NB de largeur $\delta\lambda=1$ nm dans lesquelles les indices de clarté sont corrélées à celles des KB et ensuite utiliser ces indices de clarté dans une interpolation et extrapolation linéaire pour couvrir un domaine spectral donné. Nous nous limiterons dans ce qui suit à l'intervalle [283, 844] nm, qui couvre les bandes spectrales d'intérêt ici. Cet intervalle est l'union des bandes KB #3 à #19.

KT_{NB_j} , $KT_{NB_j}^{dir}$ et I_{oNB_j} dénotent respectivement l'indice de clarté, l'indice de clarté direct et l'éclairement au sommet de l'atmosphère sur un plan normal aux rayons solaires pour la $j^{\text{ème}}$ NB_j :

$$KT_{NB_j} = \frac{G_{NB_j}}{I_{oNB_j} \cos \theta_s} \quad (4.9)$$

$$KT_{NB_j}^{dir} = \frac{B_{NB_j}}{I_{oNB_j}} \quad (4.10)$$

En introduisant les indices de clarté dans l'équation (4.5) pour l'éclairement global et direct, nous obtenons :

$$QG_{bsp} = \sum_{j=1}^N I_{oNB_j} KT_{NB_j} RS_{NB_j} \cos(\theta_s) \quad (4.11)$$

$$QB_{bsp} = \sum_{j=1}^N I_{oNB_j} KT_{NB_j}^{dir} RS_{NB_j} \quad (4.12)$$

Notre technique de ré-échantillonnage s'inspire de la publication de [Navntoft et al. \(2009\)](#) qui ont trouvé une relation affine entre l'éclairement global UV-A [315, 400] nm et l'éclairement global monochromatique à 380 nm, à l'aide de simulations réalisées avec le MTR Tropospheric Ultraviolet and Visible (TUV 4.1) :

$$G_{UV-A} = 72,5679 (\pm 0.0066) G_{\lambda=380nm} - 0.0207 (\pm 0.0116) \quad (4.13)$$

avec $R^2=0,99$ et pour 5970 états atmosphériques. Autrement dit, la variabilité de l'atténuation par l'atmosphère de l'éclairement dans une bande large (UV-A) est expliquée par la variabilité à une seule longueur d'onde ($\lambda = 380nm$) appartenant à cette bande large. Nous avons réalisé une étude similaire avec le MTR libRadtran et trouvé le même résultat. Nous avons également trouvé que d'autres longueurs d'onde telles que 362 nm, 354 nm, et 373 nm présenteraient des relations similaires, avec parfois une meilleure précision qu'à 380 nm quelque soit l'état atmosphérique.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons à l'indice de clarté plutôt qu'à l'éclairement. Les bandes larges représentent ici les bandes KB. Nous établirons des modèles mathématiques qui sont des fonctions affines entre les indices de clarté des bandes

KB et les sous-bandes NB_j entièrement incluses dans les bandes KB correspondantes :

$$KT_{NB_j}^{dir} = \alpha_{Bj} KT_i^{dir} + \beta_{Bj} \quad (4.14)$$

$$KT_{NB_j} = \alpha_{Gj} KT_i + \beta_{Gj} \quad (4.15)$$

avec α_{Bj} et α_{Gj} représentant respectivement les pentes et β_{Bj} et β_{Gj} les ordonnées à l'origine obtenues des régressions linéaires entre les indices de clarté et les indices de clarté direct des KB et les NB incluses. Pour cela, nous avons construit 60000 états atmosphériques avec des tirages de type Monte Carlo (cf tableau 3.2). Les fonctions affines sont établies à partir des simulations numériques réalisées par le MTR libRadtran dont les entrées sont ces 60000 états atmosphériques.

Considérant qu'une bande KB à une largeur moyenne de 30 nm, il faudrait 30 sous-intervalles NB_j de 1 nm de largeur, en moyenne. Pour l'ensemble des 17 KB, il faudrait établir $30 \times 17 = 510$ fonctions affines. Le nombre de fonctions peut être réduit en utilisant une approche similaire à celle de [Navntoft et al. \(2009\)](#) c'est-à-dire chercher un NB qui permettrait de représenter la KB correspondante et pour chaque KB. La distribution spectrale de KT est calculée par interpolation ou extrapolation linéaire des KT connus aux NB choisis.

La sélection des fonctions affines, et donc des longueurs d'onde NB_j devant représenter une KB, est faite de manière empirique comme suit. Pour chaque KB, nous avons tracé le corrélogramme entre KT_{KB} et chaque KT_{NB_j} pour NB_j inclus dans KB pour les 60 000 états atmosphériques. La dispersion du nuage de points autour de la droite définie par moindre carrés est généralement faible. Nous désirons le plus petit nombre de fonctions. La sélection est faite de manière itérative. Nous avons sélectionné les 17 NB_j qui correspondent aux 17 KB. Puis, nous avons comparé le résultat de l'interpolation linéaire sur les 17 KT_{NB_j} à la courbe tous les nm, et ce pour quelques états atmosphériques arbitrairement choisis dans les 60 000 états atmosphériques. Nous avons visuellement détecté les zones où les différences étaient grandes et avons rajouté des NB_j dans ces zones pour mieux contraindre l'interpolation. Nous avons répété l'opération jusqu'à obtenir un résultat que nous avons jugé satisfaisant.

Le tableau 4.3 récapitule pour chaque KB, les sous-bandes NB sélectionnées, les pente et ordonnée à l'origine des fonctions affines sélectionnées pour estimer les indices de clarté et les indices de clarté directe suivant les equations (4.14) et (4.15). Ces fonctions affines sont établies une fois pour toutes, et seront utilisées ultérieurement pour n'importe quel état atmosphérique.

Nous remarquons que toutes les KB contiennent un unique sous-intervalle sauf les KBs # 5, 12, 14, 16, 17, 18, et 19 qui ont respectivement 2, 4, 3, 3, 5, 6, et 3 sous-intervalles.

Ces KB contiennent une grande variabilité de l'indice de clarté qui ne peut pas être captée par une unique sous-bande. L'analyse spectroscopique révèle dans ces bandes deux, voire plus, molécules absorbantes qui atténuent le rayonnement solaire. C'est le cas de la bande # 18 dans laquelle plusieurs espèces gazeuses absorbent le rayonnement. Dans les KB ayant un seul sous-intervalle, la diffusion moléculaire est le phénomène d'interaction le plus important.

TABLEAU 4.3 – Pente et ordonnée à l'origine sélectionnées pour le ré-échantillonnage

# KB	Intervalle	Sous-intervalle	Direct	normal	Global	
	$\Delta\lambda_i$	$\delta\lambda_j$	α_{Bj}	β_{Bj}	α_{Gj}	β_{Gj}
3	283 – 307	304 – 305	3,0852	0,0003	3,0900	0,0007
4	307 – 328	319 – 320	1,0886	-0,0007	1,1264	-0,0175
5	328 – 363	332 – 333	0,8992	-0,0103	1,0247	-0,0519
		345 – 346	1,0112	-0,0004	0,9946	0,0152
6	363 – 408	385 – 386	0,9987	-0,0023	1,003	-0,0032
7	408 – 452	430 – 431	1,0026	-0,0004	0,9995	0,0013
8	452 – 518	484 – 485	1,0034	0,0005	0,9979	0,0000
9	518 – 540	528 – 529	0,9998	-0,0005	1,0008	-0,0013
10	540 – 550	545 – 546	1,0001	0,0003	1,0003	-0,0003
11	550 – 567	558 – 559	1,0004	0,0004	0,9997	0,0012
		569 – 570	0,9960	-0,0119	1,0024	-0,0100
		586 – 587	1,0123	0,0064	0,9929	0,0267
12	567 – 605	589 – 590	0,9568	-0,0109	0,9804	-0,0434
		602 – 603	1,0150	0,0167	1,0051	0,0212
		615 – 616	1,0004	0,0009	0,9977	0,0033
13	605 – 625	625 – 626	1,0104	-0,0174	1,0622	-0,0551
		644 – 645	1,0072	0,0029	0,996	0,0154
		656 – 657	0,9915	0,0068	0,9698	0,0205
14	625 – 667	675 – 676	1,0006	0,0007	0,9978	0,0036
		685 – 686	1,0473	0,0212	0,9681	0,1036
15	667 – 684	687 – 688	0,9602	-0,0130	1,0041	-0,0531
		694 – 695	0,9828	-0,0153	1,0323	-0,0642
		715 – 716	1,0262	0,0121	0,9771	0,0596
16	684 – 704	719 – 720	0,899	-0,0704	1,1197	-0,2733
		722 – 723	1,0049	-0,0118	1,0457	-0,0491
		724 – 725	0,9484	-0,0478	1,1046	-0,1921
		736 – 737	1,0156	0,0212	0,9663	0,0626
		744 – 745	1,0629	-0,0036	1,0401	0,0262
17	704 – 743	757 – 758	1,0622	0,0096	1,0169	0,0580
		760 – 761	0,4914	-0,0805	0,7613	-0,3480
		769 – 770	1,0459	0,0137	0,9975	0,0598
		784 – 785	1,0492	0,0300	0,9688	0,1032
		790 – 791	1,0158	0,0078	1,0135	0,0008
18	743 – 791	794 – 795	1,029	0,0205	0,9169	0,1316
		802 – 803	1,0152	0,0068	0,9662	0,0558
		806 – 807	1,0247	0,0284	0,9085	0,1406
19	791 – 844					

Le tableau 4.3 pourrait être intégré dans les modèles de transfert radiatifs (libRadtran et DAK), SPECMAGIC ou algorithmes simplifiés (Mueller *et al.*, 2012) basés sur l'approche de Kato *et al.* (1999) pour leur permettre de produire une distribution spectrale de l'éclairement solaire avec une grande résolution spectrale. Au-delà des bornes extrêmes

des fonctions choisies : 304 nm et 807 nm, une extrapolation doit être faite. Elle peut alors produire des valeurs négatives qu'il conviendra de mettre à 0. Il serait possible de reproduire une étude similaire mais étendue à d'autres intervalles, par exemple, les KB #20 et au-delà, ce qui, en étendant le tableau 4.3, remplacerait certaines extrapolations par des interpolations.

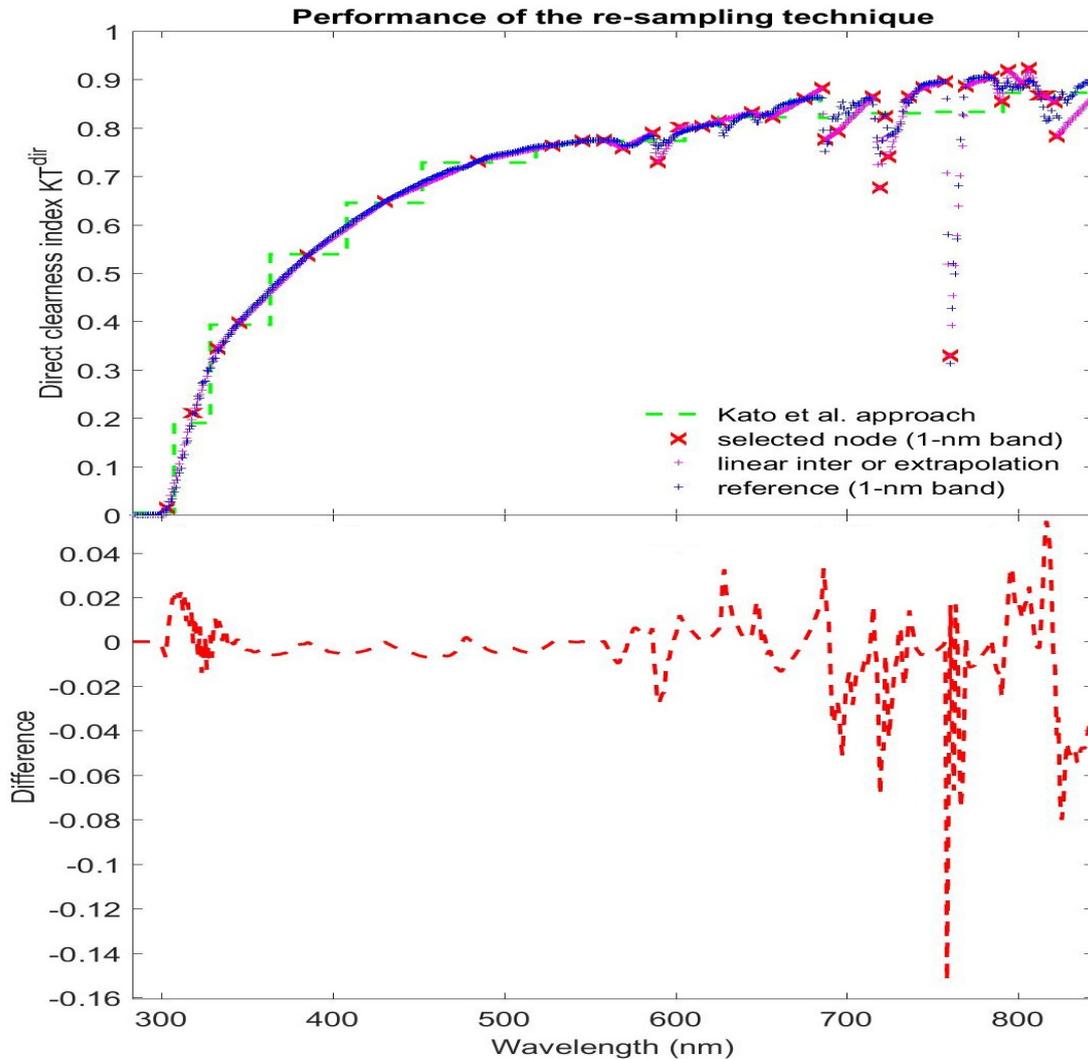


FIGURE 4.3 – Comparaison entre l'indice de clarté direct de la technique de ré-échantillonnage et celle obtenue par le calcul détaillé avec libRadtran, considérée comme référence.

La figure 4.3 est un exemple de l'application de la technique de ré-échantillonnage pour l'indice de clarté direct pour l'intervalle spectral [283, 844] nm. L'état atmosphérique est ici constitué d'un profil atmosphérique *afglus*, $\theta_s=60^\circ$, du modèle d'aérosol urbain, d'un contenu total de vapeur d'eau de 67 kg m^{-2} , d'un contenu en ozone de 324 DU, $\rho_g=0,3$, d'une épaisseur optique des aérosols à 550 nm de 0,27, d'un exposant d'Angstrom 1,3 et d'une altitude de 0 km.

Dans le graphe du haut, l'indice de clarté direct de l'approche de [Kato et al. \(1999\)](#) est représentée en tiretés verts. Les croix rouges représentent l'indice de clarté direct calculé

par l'équation (4.14) pour les longueurs d'onde sélectionnées (cf. tableau 4.3). Ces croix rouges servent de support aux interpolations et extrapolations qui permettent d'obtenir une distribution spectrale, représentée par des symboles roses. Nous pouvons observer qu'elle se juxtapose à la distribution spectrale calculée de manière détaillée (référence).

Le graphe du bas donne les écarts de transmisivités directes entre la technique de ré-échantillonnage et la référence. Les différences varient en fonction de la région spectrale. Nous pouvons conclure que la technique de ré-échantillonnage produit de bons résultats dans ce cas de manière générale. Autour de 300 nm, une surestimation par la technique de ré-échantillonnage est observée, avec un écart maximum de 0,02. On remarque une très bonne performance entre 320 et 700 nm. Les écarts deviennent notables au-delà de 700 nm où il y a une forte variabilité spectrale de l'indice de clarté direct due à la présence de plusieurs molécules absorbantes, avec un écart maximum autour de 760 nm. C'est une zone à forte absorption moléculaire due à l'oxygène, pour laquelle la fonction affine choisie présente un faible coefficient de détermination de 0,76. La dispersion du nuage de points obtenu est large et le RMSE est de 26 % relativement à la valeur moyenne de l'indice de clarté direct.

La figure 4.4 présente le même cas que la figure 4.3 mais pour l'indice de clarté. Cette dernière est supérieure à l'indice de clarté direct, mais les courbes ont la même allure. Les écarts notables pour l'indice de clarté se trouvent dans les mêmes régions spectrales que ceux pour l'indice de clarté direct, avec généralement une plus grande amplitude.

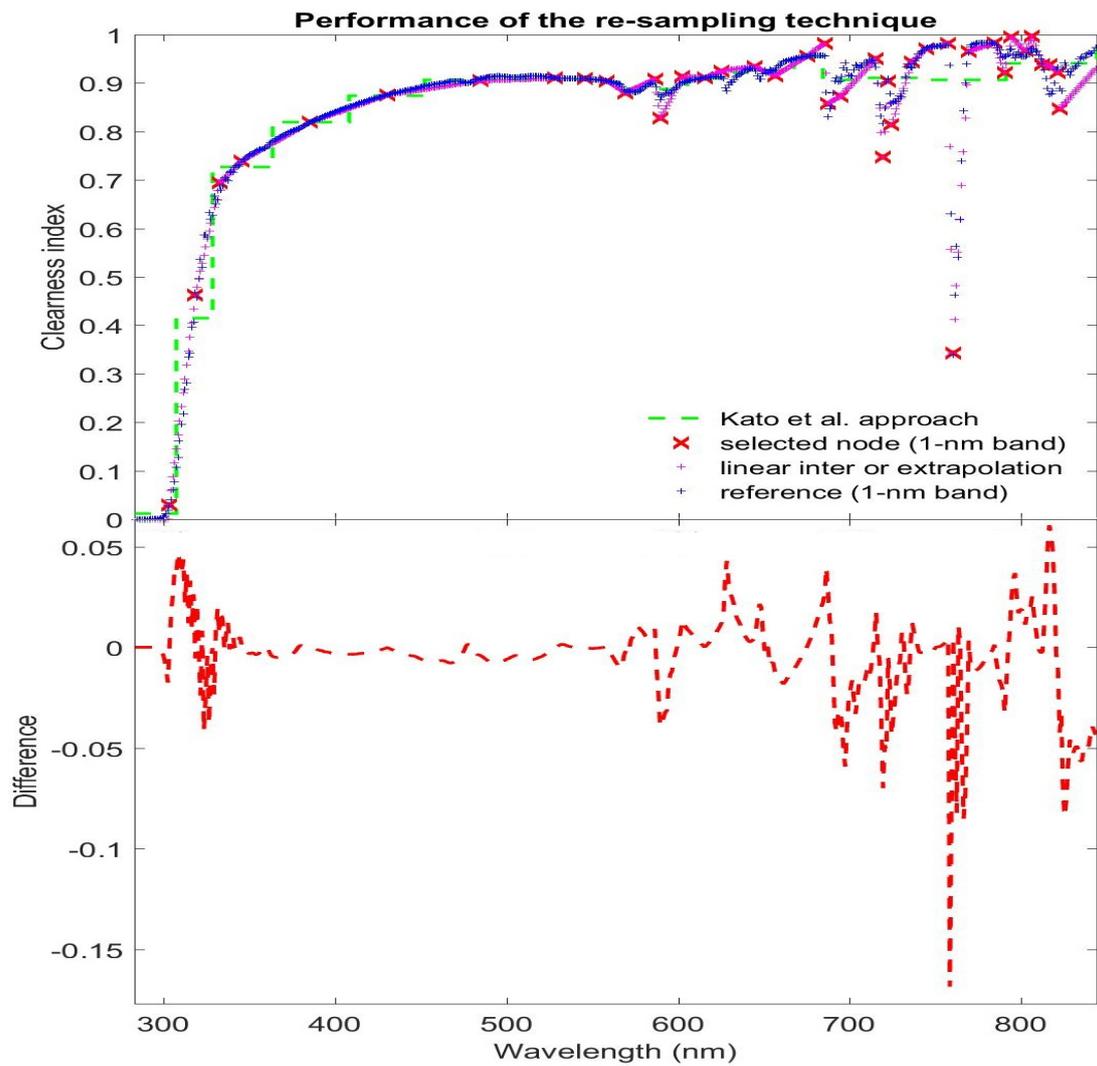


FIGURE 4.4 – Comparaison entre l'indice de clarté de la technique de ré-échantillonnage et celle obtenue par le calcul détaillé avec libRadtran, considérée comme référence.

4.2 Validation numérique des techniques développées

Cette partie présente la validation numérique des deux techniques d'estimation développées par rapport au calcul détaillé. Un nouvel échantillon de 15 000 états atmosphériques a été obtenu par tirages aléatoires. Les écarts : modèle - référence, ont été calculés et synthétisés par des quantités statistiques pour les éclairements direct et global. Les lois uniformes ont été affectées à l'angle zénithal et l'albédo du sol suivant leurs bornes respectives $[0; 90^\circ]$ et $[0; 1]$. Les erreurs produites par les deux méthodes par comparaison avec les calculs détaillés de référence de libRadtran sont présentées sous forme de diagrammes radar.

4.2.1 Performance des techniques pour l'estimation des éclairements dans les bandes spectrales particulières UV et PAR

La figure 4.5 est un diagramme radar des performances des deux techniques proposées sur l'éclairement direct normal et global dans la bande spectrale particulière ultraviolet. On remarque pour l'éclairement direct normal UV dont la moyenne est de $24,0 \text{ W m}^{-2}$ (figure 4.5a), que les bias et les RMSE sont de $-0,1 \text{ W m}^{-2}$ ($-0,4 \%$) et $0,2 \text{ W m}^{-2}$ ($0,7 \%$) pour le ré-échantillonnage et $-0,3 \text{ W m}^{-2}$ ($-1,3 \%$) et $0,4 \text{ W m}^{-2}$ ($1,5 \%$) pour la sommation pondérée. Les deux techniques possèdent un coefficient de détermination supérieur à 0,99. Ce qui veut dire plus de 99 % de l'information contenue dans les estimations de référence est expliquée par les deux techniques. En général, les deux techniques proposent de très bonnes performances. La bonne performance peut s'expliquer partiellement par la grande précision des estimations de l'approche de [Kato et al. \(1999\)](#). La précision des régressions linéaires établies contribue en partie à la bonne performance de la technique de ré-échantillonnage.

On remarque que pour l'éclairement global UV de moyenne de $47,7 \text{ W m}^{-2}$ (figure 4.5b), les biais et les RMSE sont de $+0,4 \text{ W m}^{-2}$ ($+0,8 \%$) et $0,4 \text{ W m}^{-2}$ ($0,8 \%$) pour le ré-échantillonnage et $+0,5 \text{ W m}^{-2}$ ($+1,0 \%$) et $0,5 \text{ W m}^{-2}$ ($1,1 \%$) pour la sommation pondérée. Comme pour l'éclairement direct normal, les deux techniques possèdent un coefficient de détermination supérieure à 0,99. On peut donc en conclure que les techniques développées réussissent à estimer avec grande précision les éclairements direct normal et global en UV.

La validation numérique a aussi été effectuée pour l'éclairement PAR. Les erreurs obtenues sont synthétisées dans la figure 4.6. Pour l'éclairement direct, respectivement global, les erreurs sont inférieures à 1 W m^{-2} en valeur absolue pour des valeurs moyennes de 290 W m^{-2} pour l'éclairement direct et 340 W m^{-2} pour l'éclairement global. De même, les écart-types atteignent une valeur maximale de 2 W m^{-2} . Que ce soit pour l'éclairement

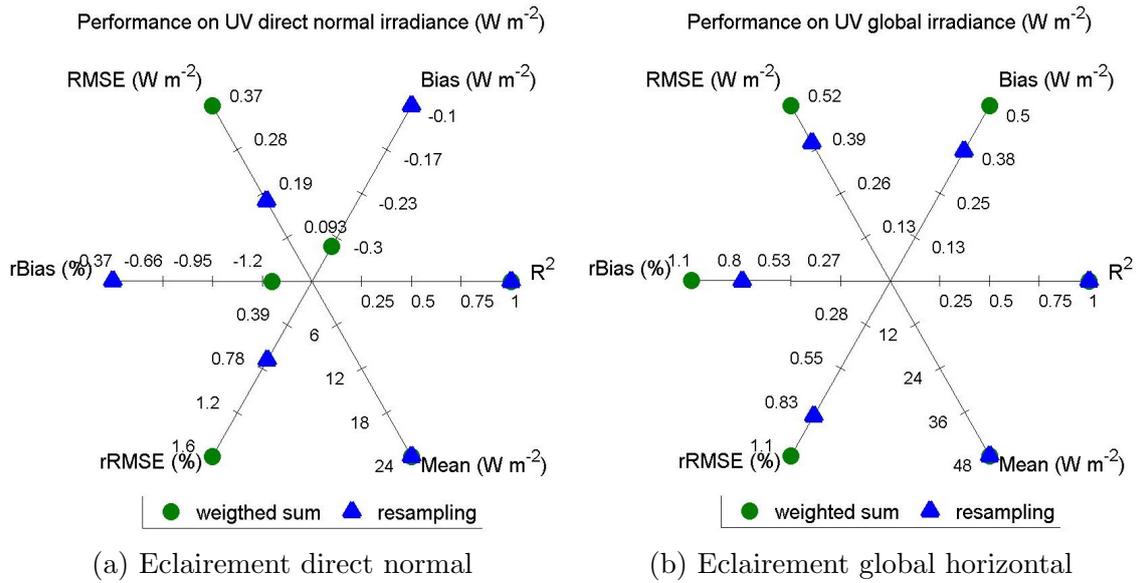


FIGURE 4.5 – Performance des deux techniques numériques pour l'estimation de l'éclairement ultraviolet.

direct ou l'éclairement global, les erreurs relatives sont inférieures à 0,5 % en valeur absolue et les RMSE sont inférieurs à 0,6 % de la valeur moyenne de l'éclairement. En général, il y a une très bonne performance des deux techniques d'estimation.

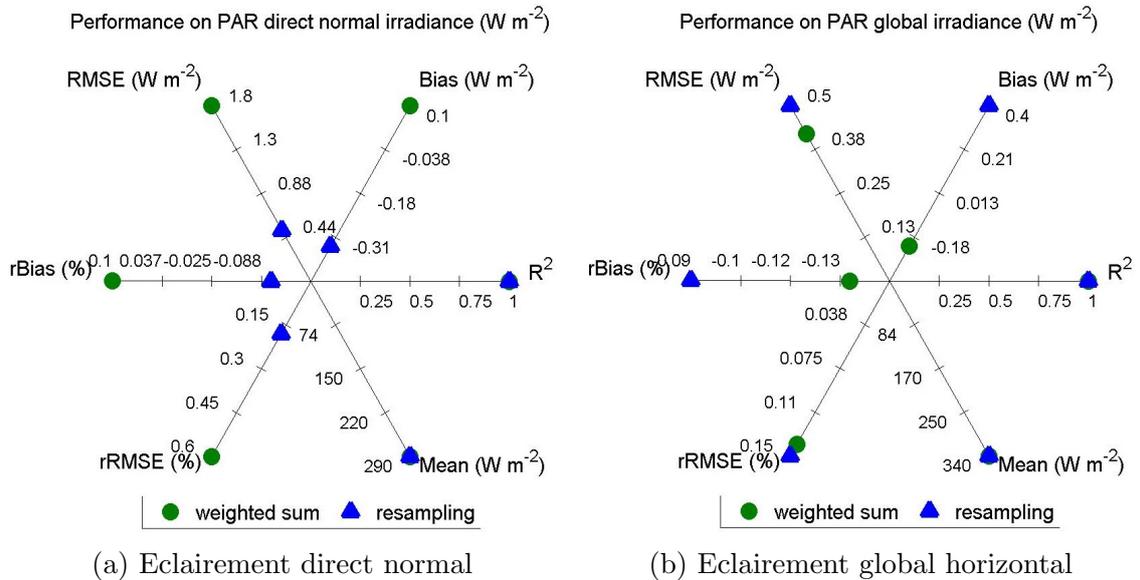


FIGURE 4.6 – Performance des deux techniques numériques pour l'estimation de l'éclairement photosynthétiquement actif.

4.2.2 Performance de la technique de ré-échantillonnage pour l'estimation de la densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD) et l'éclairement lumineux

La figure 4.7 présente les indicateurs statistiques pour la densité de flux de photons photosynthétiques et l'illuminance. Que ce soit pour le PPFD global ou direct, le niveau de performance est appréciable. En PPFD global, le biais est $+0,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, soit $+0,1 \%$ de la valeur moyenne de référence, traduisant une très faible surestimation de la technique. La même surestimation : $0,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($0,1 \%$), est observée pour le PPFD direct. Les RMSE sont d'environ $2,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Dans les deux cas, le coefficient de détermination est plus grand que 0,99, signifiant que la technique reproduit la variabilité des estimations de référence. Pour l'illuminance, les performances de la technique de ré-échantillonnage sont aussi remarquables avec des biais et RMSE moindres que $0,3 \%$ de la valeur moyenne.

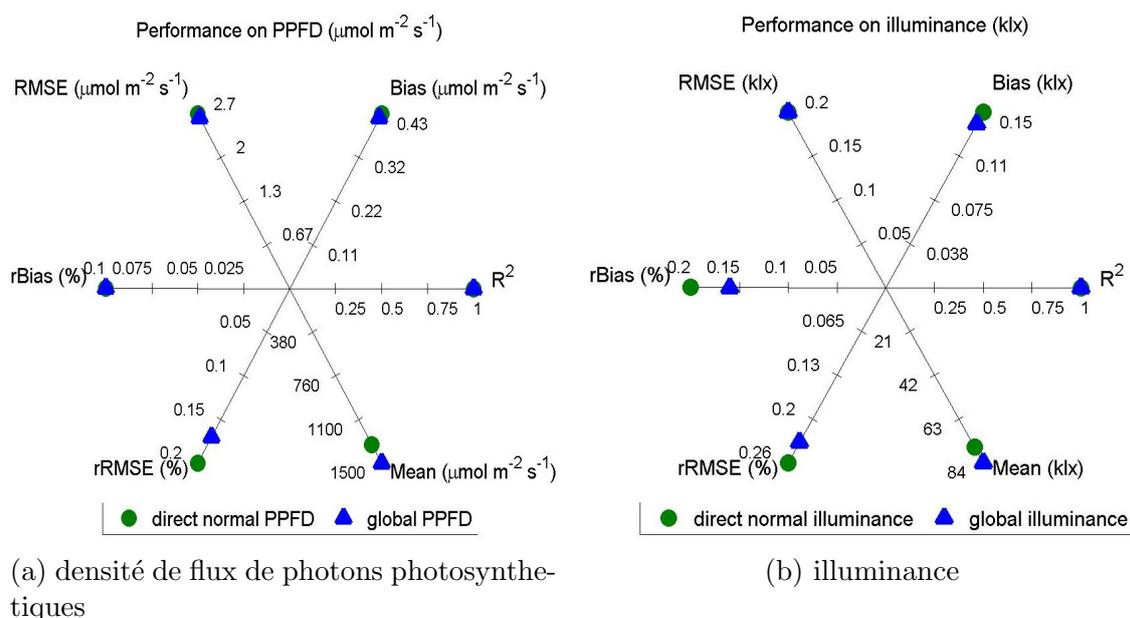


FIGURE 4.7 – Performance du ré-échantillonnage pour l'estimation de l'éclairement pondéré par les réponses spectrales des plantes (à gauche) et de l'œil (à droite).

Le travail présenté ici a fait l'objet d'un article par [Wandji Nyamsi *et al.* \(2015b\)](#) appliquée uniquement à l'estimation de l'éclairement de la photosynthèse des plantes.

4.3 Conclusion

Ce chapitre a présenté deux techniques mathématiques qui exploitent les estimations de l'approche de Kato *et al.* (1999) pour calculer des éclaircissements dans des bandes spectrales

particulières. Les deux affichent quasiment les mêmes et très bons niveaux de performances sur l'UV et le PAR.

D'un point de vue pratique, la technique de ré-échantillonnage demande plus d'efforts en calcul numériques que la technique de sommation pondérée. Mais pour des éclairagements et autres grandeurs physiques dépendant de la réponse spectrale, la technique de ré-échantillonnage est plus adaptée à cause de sa représentation plus fine de la distribution spectrale de l'éclairagement solaire.