

Approche modale multilinéaire pour la décomposition spatio-temporelle du champ de rayonnement en milieu urbain

Guillaume LE GALL^{1*}, Martin THEBAULT¹, Valeria SIMONCINI², Julien RAMOUSSE¹

¹ LOCIE UMR 5271, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, 73370 Le Bourget-du-Lac, France

² Dipartimento di Matematica, Università di Bologna, 40126 Bologna, Italy

(auteur correspondant : guillaume.le-gall@univ-smb.fr)

Résumé - La décomposition de la variabilité spatio-temporelle du rayonnement en milieu urbain par approche modale multilinéaire est explorée. Le champ annuel d'irradiance sur un bâtiment cubique au centre d'un quartier théorique présentant une hétérogénéité structurelle est estimé par méthodes Monte Carlo. Celui-ci est organisé en tenseur d'ordre $N = 3$ sur la base de ses spécificités temporelles *a priori*, puis factorisé par décomposition en valeurs singulières multilinéaire (Tucker HOSVD). Les modes extraient facilitent l'identification des régions de l'enveloppe sujettes à des variations d'irradiance. Les périodes journalières et saisonnières de forte variabilité sont identifiées, et les perturbations connexes de la distribution spatiale du rayonnement direct par les obstructions dominantes sont décrites.

Abstract - The applicability of higher-order modal decomposition for the detailed analysis of solar radiation variability in intricate built areas is explored. The annual irradiance on a cubic building located at the centre of a theoretical district granted structural heterogeneity is estimated with a backwards Monte Carlo method. The latter is arranged as an order $N = 3$ tensor from its *a priori* known temporal characteristics, and factorised via Higher-Order Singular Value Decomposition (Tucker HOSVD). Extracted modes help the identification of variability-prone envelope regions. Information about daily and seasonal periods of high irradiance variability is obtained, and related changes in the spatial distribution of direct radiation from prominent obstructions are educed.

1. Introduction

L'urbanisation grandissante de la société déplace peu à peu l'épicentre de la consommation énergétique vers le milieu urbain [1]. Portées par le solaire, les énergies renouvelables sont alors progressivement adoptées pour limiter l'empreinte carbone des villes [2]. Les surfaces comme les façades ou les toits deviennent ainsi de potentiels collecteurs du rayonnement solaire.

La production d'énergie solaire à l'échelle urbaine reste entravée par sa complexité morphologique intrinsèque. L'agrégation de diverses géométries perturbe la propagation des composantes directe (*e.g.* ombres dynamiques portées) et diffuse (*e.g.* multiples reflections) du rayonnement solaire incident [1]. Ceci entraîne des variations importantes de la densité surfacique de flux radiatif, ou irradiance [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], reçue par une région donnée. L'impact du milieu urbain vient ici agrémenter les variations déterministes journalières et saisonnières d'irradiance au sol causées par la course naturelle du soleil, et les perturbations antérieures dues aux événements radiatifs stochastiques dans la couche atmosphérique. Cette diversité de facteurs amène notamment à des variations s'étalant sur une large gamme d'échelles spatio-temporelles, allant du décimètre et/ou de la seconde jusqu'à des zones de centaines de kilomètres de large et/ou plusieurs jours [3]. Bien que plusieurs travaux aient adressé la variabilité du rayonnement solaire pour des définitions temporelles élevées [4, 5], ceux-ci se sont limités à de larges périmètres (*e.g.* région, pays). Une caractérisation fine et simultanée de cette variabilité en temps et en espace est pourtant nécessaire pour *e.g.* la préconisation de structures architecturales performantes

(éclairage naturel, apport solaire passif), la gestion efficiente des réseaux énergétiques urbains [1] (optimisation du positionnement des collecteurs, flexibilité de la production), la définition de modèles de microclimat urbain robustes [6] ou l'organisation des espaces intra-urbains. Pour cela, il est particulièrement important de considérer l'aspect tridimensionnel des infrastructures présentes, venant enrichir la perturbation de la distribution locale d'irradiance.

Récemment, les auteurs ont exploré pour la première fois l'utilisation de l'analyse en composantes principales (PCA) pour caractériser la variabilité spatio-temporelle annuelle du rayonnement solaire dans un contexte urbain, avec des résolutions de 1 m^2 et 15 minutes, respectivement [7]. La PCA matricielle est étendue ici à l'algèbre multilinéaire, en vue d'affiner l'analyse de la variabilité du champ d'irradiance d'après ses principaux axes de variation présumés via une décomposition selon $N \geq 3$ dimensions. La méthode de Tucker [8] est adoptée et implémentée par décomposition en valeurs singulières multilinéaire (HOSVD) [9]. Le champ physique multidimensionnel *a priori* exprimé comme structure de $\mathbb{R}^{n_1 \times n_2 \times \dots \times n_N}$ est factorisé en un tenseur *noyau* de même ordre N et autant de bases propres de modes vectoriels relatives à chaque dimension, d'après une approximation au sens des moindres carrés. La variabilité est ainsi partitionnée suivant N dimensions, dont les structures dominantes sont données par les modes extraits et les interactions intermodales quantifiées par les éléments du noyau.

Ce travail explore l'applicabilité d'une approche modale multilinéaire pour la décomposition de la variabilité du champ d'irradiance en milieu urbain. L'étude porte sur un bâtiment cubique au centre d'un quartier théorique peuplé de structures parallélépipédiques et présentant une variation régionale de ses facteurs de forme global H^* et de recouvrement κ . La Section 2.1. détaille le modèle physique. Le rayonnement annuel incident sur l'enveloppe du bâtiment (résolutions de 1 m^2 et 15 min) est estimé par méthodes Monte Carlo (Sec. 2.2.). Le champ simulé est ensuite arrangé en tenseur d'ordre $N = 3$ sur la base de ses spécificités temporelles intrinsèques, puis factorisé selon ses modes propres de variation par une approche de Tucker HOSVD (Sec. 2.3.). L'interprétation physique des modes extraits est présentée en Section 3. La dernière partie (Sec. 4.) conclue sur la pertinence de l'approche présentée au vu desdits objectifs, et détaille les perspectives envisagées.

2. Méthodologie

2.1. Propriétés géométriques et radiatives du modèle physique

Le modèle géométrique défini un quartier théorique de côté $L_D = 100 \text{ m}$ (Fig 1.a). Un cube

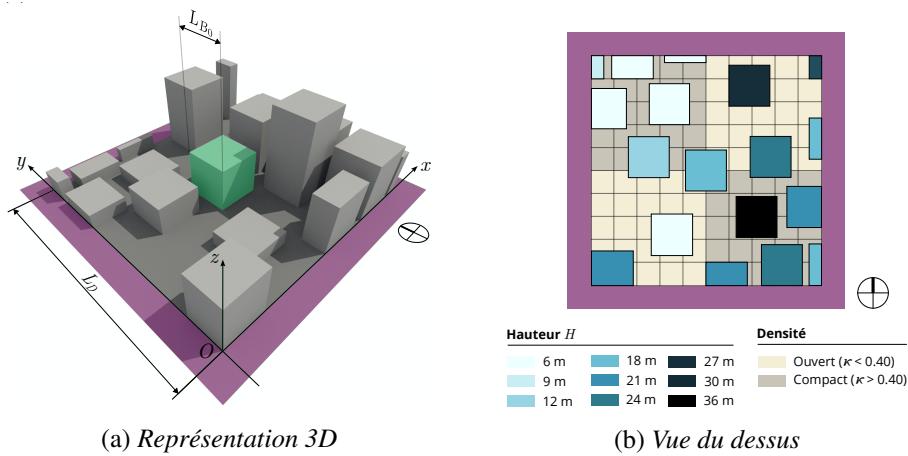


Figure 1 : Géométrie du modèle de quartier urbain. Le bâtiment étudié est indiqué en vert (a).

de dimension $L_{B_0} = 0.18L_D$ est placé au centre (bloc vert), entouré de structures parallélépipédiques aléatoirement disposées. Un facteur de forme global^a $H^* = 0.180$ et de recouvrement^b $\kappa = 0.410$ sont adoptés (typologie *semi-compact mid-rise* [10]). Une hétérogénéité structurelle, en termes de hauteur moyenne et de densité de bâtiment, est par ailleurs appliquée à l'ensemble du quartier *via* sa subdivision en régions de largeurs ($L_D/2$) identiques et couples (H^*, κ) distincts (Fig. 1.b). Les valeurs des indicateurs morphologiques sont données dans le Tableau 1.

	Sud-est (se)	Sud-ouest (so)	Nord-ouest (no)	Nord-est (ne)	Quartier global
Typologie LCZ [10]	<i>Compact high-rise</i>	<i>Open mid-rise</i>	<i>Compact low-rise</i>	<i>Open high-rise</i>	<i>Semi-compact mid-rise</i>
Hauteur moyenne de bât. \bar{H} [m]	25.14	13.33	8.23	25.31	18.00
Facteur de forme global H^{*a} [-]	0.251	0.133	0.082	0.253	0.180
Facteur de recouvrement κ^b [-]	0.529	0.292	0.492	0.326	0.410

^a Rapport entre la hauteur moyenne de bâtiment \bar{H} et le côté L_{100} d'un plan de référence d'aire $100 \times 100 \text{ m}^2$ (valide si tout $H \leq 100 \text{ m}$).

^b Rapport entre l'empreinte au sol cumulée des bâtiments et la surface effective du site.

Tableau 1 : Principaux paramètres typologiques et morphologiques de la géométrie évaluée.

L'étude portant sur l'impact même de la géométrie, les propriétés radiatives des surfaces et les conditions atmosphériques sont intentionnellement simplifiées. Tous les matériaux sont considérés comme gris, opaques et Lambertiens (aucune dépendance directionnelle et spectrale). Le coefficient de réflexion diffuse ρ , spécifié ici sous la forme d'une BRDF* Lamber-tienne constante (spectralement), décrit ainsi complètement les propriétés surfaciques des structures et définit, avec la géométrie, les conditions aux limites avec l'atmosphère. Un béton foncé ($\rho_{bat} = 0.20$) et un revêtement en asphalt ($\rho_{sol} = 0.10$) sont respectivement attribués aux enveloppes des bâtiments et au sol, d'après les valeurs moyennes typiques du milieu urbain [11]. La localité de Paris, France (climat tempéré, moyenne latitude) est choisie. Un modèle de ciel clair est défini, *via* une description physique et radiative de la couche atmosphérique en l'absence de gouttelettes d'eau en suspension à l'aide du code ecRad [12].

2.2. Modélisation du champ annuel d'irradiance

La propagation du rayonnement est évaluée à l'aide du modèle de référence pour les transferts radiatifs en milieu urbain htrdr-urban. Le code a été validé vis-à-vis d'un modèle bien établi basé sur la méthode des radiosités [13], puis récemment utilisé dans des travaux impliquant des géométries urbaines [7, 14]. Une approche par méthodes Monte Carlo (MCM), largement utilisées et validées pour la modélisation des transferts radiatifs, est adoptée pour la résolution des solutions intégrales de l'équation de transfert radiatif. Elle est ici combinée à la technique des algorithmes à collision nulle, rendant le temps de calcul quasi-insensible aux dimension et résolution du modèle 3-D [13]. Cela permet ainsi une description précise des interactions (*e.g.* diffusions et réflexions multiples) susceptibles d'intervenir à l'échelle urbaine locale et au sein de la couche atmosphérique. Un tel degré de précision permet notamment de pallier le manque de données empiriques disponibles, en minimisant l'écart possible entre les valeurs simulées et les mesures réelles autrement obtenues.

Le champ annuel d'irradiance sur l'enveloppe du bâtiment central (Fig. 1a) est évalué. Les quatre façades et le toit sont discrétilisés en grilles de points de mesure régulièrement espacés de $\Delta x = 1 \text{ m}$ dans les deux directions du plan ($n_x = 324$ points par face). La densité de flux radiatif surfacique (discrete) est ainsi estimée sur l'intervalle $[0.3 \mu\text{m}; 3.0 \mu\text{m}]$ pour une année entière non-bissextile par simulations MCM successives ($\Delta t = 15 \text{ min}$; $n_t = 35\,040$

*. Bi-directional Reflectance Distribution Function

simulations temporelles). Une résolution de 10 000 estimations par pixel est fixée pour chaque simulation MCM indépendante. La position angulaire instantanée du soleil ($\pm 0.0003^\circ$) fournie à htrdr-urban est calculée avec l'algorithme SPA [15] pour les coordonnées géographiques du site ($48^\circ 51' 0''$ N; $2^\circ 20' 24''$ E; 49 m alt.) et les données climatiques au sol ($P = 1013$ Pa; $T = 294.2$ K). Noter que les profils atmosphériques obtenus avec ecRad (Sec. 2.1.) sont conformément aux susdites spécifications.

2.3. Décomposition de Tucker

Soit $e(\mathbf{x}, t)$ le champ d'irradiance reçu par la surface $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ du bâtiment sur la période annuelle $T \in \mathbb{R}$. Afin de se focaliser sur les variations induites par l'environnement bâti, la contribution déterministe du mouvement apparent du soleil par rapport au sol est retirée ici, tel que :

$$e(\mathbf{x}, t) = \tilde{e}(\mathbf{x}, t) - e_0(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^3, \quad t \in T \text{ (Ctr)}, \quad (1)$$

avec $\tilde{e}(\mathbf{x}, t)$ et $e_0(\mathbf{x}, t)$ (NoObs) les densités de flux radiatif sur $T \otimes \Omega$ en conditions de ciel clair avec et sans obstructions, respectivement. Les sous-espaces $T = \{t_{k_{12}}\}_{k_{12}=1}^{n_t}$ et $\Omega = \{\mathbf{x}_{k_3}\}_{k_3=1}^{n_\Omega}$ sont discréétisés d'après la définition spatio-temporelle des simulations MCM indépendantes (Sec. 2.2.). Pour rendre compte des cycles journaliers et saisonniers du champ d'irradiance *a priori* connus, l'axe temporel est à nouveau subdivisé en deux espaces vectoriels distincts $T_a = \{t_{k_1}\}_{k_1=1}^{n_{t,a}}$ et $T_j = \{t_{k_2}\}_{k_2=1}^{n_{t,j}}$ décrivant respectivement les dimensions annuelles ($n_{t,a} = 365$ jours) et journalières ($n_{t,j} = 96$ quarts d'heure), tel que $T = T_a \otimes T_j$. Le signal $e(\mathbf{x}, t)$ est ainsi représenté par un tenseur $\mathcal{E} \in \mathbb{R}^{n_{t,a} \times n_{t,j} \times n_\Omega}$ de rang multilinéaire (R_1, R_2, R_3).

La décomposition de Tucker cherche une base orthonormale de produits externes vectoriels $(\mathbf{v}_{r_1}^{(1)} \otimes \mathbf{v}_{r_2}^{(2)} \otimes \mathbf{v}_{r_3}^{(3)})$ ($r_i \in \{1, 2, \dots, R_i\}$, $i = 1, 2, 3$) pour le champ \mathcal{E} , tel que :

$$\hat{\mathcal{E}} = \sum_{r_1=1}^{R_1} \sum_{r_2=1}^{R_2} \sum_{r_3=1}^{R_3} \sigma_{r_1 r_2 r_3} (\mathbf{v}_{r_1}^{(1)} \otimes \mathbf{v}_{r_2}^{(2)} \otimes \mathbf{v}_{r_3}^{(3)}), \quad (2)$$

où $\{\mathbf{v}_{r_1}^{(1)}\}_{r_1=1}^{R_1}$, $\{\mathbf{v}_{r_2}^{(2)}\}_{r_2=1}^{R_2}$ et $\{\mathbf{v}_{r_3}^{(3)}\}_{r_3=1}^{R_3}$ engendrent respectivement T_a , T_j et Ω . Les bases propres $\{\mathbf{v}_{r_i}^{(i)}\}_{r_i=1}^{R_i}$ sont orthogonales dans leur espace vectoriel respectif et déterminées de façon à minimiser l'erreur de reconstruction (au sens des moindres carrés) :

$$\min_{\hat{\mathcal{E}}} \left\| \mathcal{E} - \hat{\mathcal{E}} \right\|_F^\dagger, \quad (3)$$

pour toute troncature de $\hat{\mathcal{E}}$ au rang (r_1, r_2, r_3) .

Comme pour la PCA en algèbre linéaire, l'approche de Tucker amène à une décomposition exacte du signal en *modes propres* de variation $\mathbf{v}_{r_i}^{(i)}$ relatifs maintenant à ses trois axes $i = 1, 2$ and 3 , *i.e.* temporel (annuel et journalier) et spatial. Les éléments *noyaux* $\sigma_{r_1 r_2 r_3}$ quantifient ensuite les différentes interactions intermodales, informant sur la part du comportement global expliquée par chaque triplet $(\mathbf{v}_{r_1}^{(1)}, \mathbf{v}_{r_2}^{(2)}, \mathbf{v}_{r_3}^{(3)})$. Par convention, les modes $\mathbf{v}_{r_i}^{(i)}$ sont ordonnées par valeurs décroissantes de leurs contributions à la variabilité dimensionnelle \S , mesurée par leurs valeurs singulières associées $\sigma_{r_i}^{(i)}$ relatives au dépliement de \mathcal{E} selon sa i -ème dimension.

La factorisation est réalisée ici par décomposition en valeurs singulières multilinéaire (HOSVD), dont l'algorithme est détaillé dans le papier original par De Lathauwer *et al.* [9].

\dagger . La norme de Frobenius $\|\cdot\|_F$ est raisonnablement étendue ici à l'algèbre multilinéaire.

\S . Entendre ici ‘la variabilité exclusivement relative une dimension i donnée’.

3. Résultats

Les résultats obtenus par Tucker HOSVD pour le champ d'irradiance $\mathcal{E} \in \mathbb{R}^{n_{t,a} \times n_{t,j} \times n_x}$ reçu par le bâtiment central (Fig. 1.a) sont détaillés ci-après. La discussion se limite aux deux premiers modes $v_{1,2}^{(i)}$ ($i = 1, 2, 3$) obtenus pour les façades est et ouest (Fig. 2), jugés comme suffisamment représentatifs des résultats de la décomposition. Les modes spatiaux sont réorganisés de façon à afficher les variations surfaciques de flux sur les murs concernés. Conformément, les modes temporels tracent l'amplitudes des variations sur l'année et la journée, respectivement. L'interprétation des variations est indépendante de leur signe.

3.1. Séparation des variables spatiales et temporelles dominantes

Les modulations dominantes de l'irradiance sur l'année $v_{1,2}^{(1)}$ et la journée $v_{1,2}^{(2)}$, et ses principales variations surfaciques $v_{1,2}^{(3)}$, sont séparément illustrées par la décomposition de Tucker (Fig. 2). Des bandes fréquentielles caractéristiques sont successivement décrites par les modes temporels. Les amplitudes $v_1^{(1)}$ illustrent la distribution annuelle en *cloche* de l'irradiance pouvant être attendue sur les façades ouest (Fig. 2.a) et est (Fig. 2.b), avec un maximum autour du solstice estival. De même, les tendances dominantes des variations intra-journalières d'irradiance sont décrites par les vecteurs $v_1^{(2)}$ (Fig. 2.c-d), avec une restriction sur la matinée (est) ou l'après-midi (ouest). Les modes suivants $v_2^{(1)}$ et $v_2^{(2)}$ représentent des variations secondaires plus fines, apportant une modulation des vecteurs précédents d'indices $r_{1,2} = 1$. Par exemple, les fonctions $v_2^{(2)}$ (Fig. 2.c-d) différencient maintenant les premières et secondes parties de la période d'exposition quotidienne. Par ailleurs, l'évolution globale de la distribution spatiale d'irradiance à l'échelle de la façade est donnée par les modes $v_1^{(3)}$, tandis que les vecteurs $v_2^{(3)}$ traduisent des changements plus localisés (Fig. 2.e-f).

Les contributions respectives des modes à la variabilité du champ global d'irradiance et leurs interconnexions mutuelles sont quantifiées par les scalaires $\sigma_{r_1 r_2 r_3}$. Les distributions des premiers éléments $\sigma_{r_1 r_2 1}$ ($r_3 = 1$) nous indiquent notamment que la structure spatiale dominante $v_1^{(3)}$ est majoritairement modulée par les amplitudes $v_1^{(1,2)}$, pour les deux orientations (Fig. 2.g-h). Les trois premiers modes $r_i = 1$ relatifs à chaque dimension i peuvent ainsi être simultanément interprétés. Cette relation n'est cependant pas exclusive, comme le montrent les valeurs non-nulles des éléments non-diagonaux dans les distributions de $\sigma_{r_1 r_2 r_3}$. Les vecteurs secondaires $v_{r_1}^{(1)}$ et $v_{r_2}^{(2)}$ ($r_{1,2} \geq 2$) viennent en effet ici aussi moduler $v_1^{(3)}$. Les Figures 2.g-h montrent par exemple que $v_1^{(1)}$ resterait prépondérant dans la description des variations temporelles de $v_2^{(3)}$ pour les deux façades, par rapport aux modes annuels suivants.

3.2. Informations morphologiques sur les obstructions prépondérantes

L'extraction de modes HOSVD non-nuls justifie à elle seule la présence d'obstacles. L'asymétrie des modes extraits pour les deux orientations en Figure 2, informe par ailleurs sur les irrégularités morphologiques entre les régions ouest (so, no) et est (se, ne) du quartier.

Suite au pré-traitement en Équation 1, il est attendu que la magnitude des modes $v_{r_i}^{(i)}$ croît proportionnellement à l'obstruction du rayonnement solaire direct par la géométrie urbaine. Presque aucune variabilité n'est observée sur le tiers supérieur des modes $v_{1,2}^{(3)}$ en Fig. 2.e, trahissant ici l'absence complète d'obstruction face à cette région du mur ouest. L'empreinte du bâtiment le plus proche de ce dernier, *i.e.* le plus susceptible de perturber le rayonnement incident, est cependant dépeinte par $v_2^{(3)}$. L'écart entre les amplitudes $v_1^{(2)}$ pour le signal centré

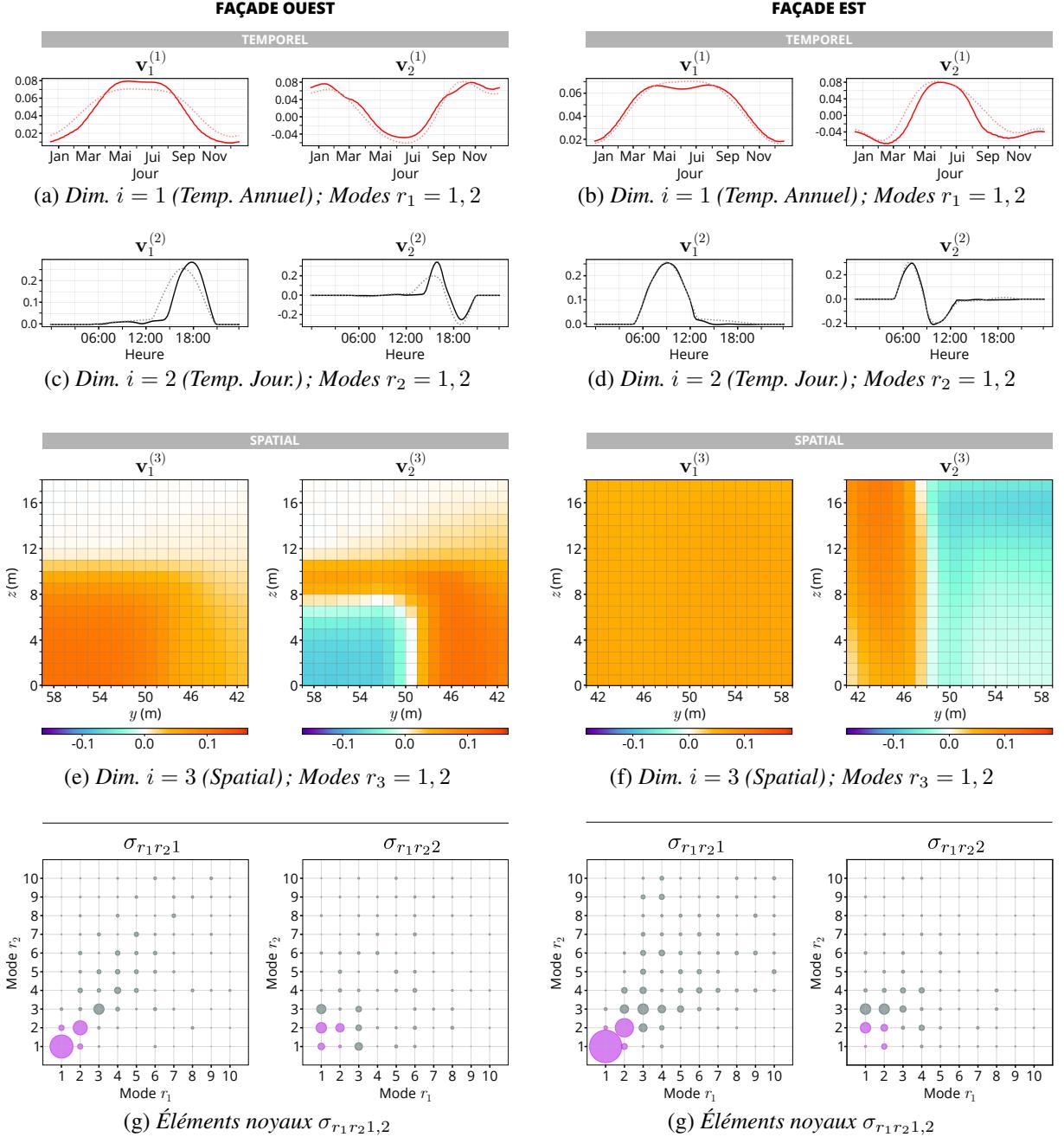


Figure 2 : Modes HOSVD $\mathbf{v}_{1,2}^{(i)}$ des variations temporelles annuelles ($i = 1$) et journalières ($i = 2$), et spatiales ($i = 1$) pour les murs ouest (colonne de gauche) et est (colonne de droite) du bâtiment vert (Fig. 1.a). Les premiers 100 scalaires $\sigma_{r_1 r_2 1,2}$ pour les modes spatiaux $\mathbf{v}_{1,2}^{(3)}$ sont également affichés (g, h). Les traits pleins et en pointillés pour les dimensions $i = 1$ et 2 correspondent au signal centré (Ctr) et estimé en l'absence d'obstructions géométriques (NoObs), respectivement.

(Ctr ; lignes pleines) et le cas NoObs (lignes pointillées) met d'avantage en évidence la perte d'irradiance moyenne en début d'après-midi due aux structures environnantes (Fig. 2.c). De même, $\mathbf{v}_1^{(3)}$ en Figure 2.f informe sur l'ombrage constant quasi-uniforme sur la façade est dû au cluster dense de hauts bâtiments dans cette région. Le mode suivant $\mathbf{v}_2^{(3)}$ décrit lui les ombres projetées par certaines structures spécifiques. Le passage du rayonnement incident dans l'interstice formé par les deux géométries faisant immédiatement face à la façade est au cours de la journée est précisément visible ici, avec l'alternation de leur obstruction respective se reflétant

dans l'inversion de signe de $\mathbf{v}_2^{(3)}$.

4. Discussion et Conclusions

Le présent article a étudié l'applicabilité des méthodes modales multilinéaires pour l'analyse de la variabilité du rayonnement solaire en milieu urbain. Le champ d'irradiance sur le bâtiment central d'un quartier théorique affichant une hétérogénéité structurelle est estimé par un modèle Monte Carlo de transferts radiatifs, puis décomposé *via* une approche de Tucker par HOSVD.

Les résultats illustrent les avantages de telles approches statistiques pour décomposer le comportement spatio-temporel du champ de rayonnement multidimensionnel observé à l'échelle urbaine. Les modes de variation dominants selon des dimensions *a priori* choisies, *i.e.* le temps suivant ses axes annuel et journalier, et l'espace, sont extraits et classés par ordre d'influence. Cette distinction des variables du problème permet leur étude isolée, aidant ainsi à l'identification des régions du bâtiment spécifiquement soumises à des variations spatiales et temporelles de la ressource solaire. Les tendances saisonnières et journalières sont clairement mises en évidence par les modes de variation temporels. Les plages fréquentielles caractéristiques successivement décrites par ces derniers informent ainsi sur les périodes quotidiennes et annuelles de forte variabilité. Les perturbations importantes de la distribution spatiale d'irradiance sur n'importe quelle facette du bâtiment sont également mises en évidence. L'obstruction du rayonnement direct par les structures environnantes à travers les ombres dynamiques projetées est décrite par les modes spatiaux, fournissant en retour des informations explicites sur leurs propriétés morphologiques (*e.g.* hauteur, densité). Les obstacles prévalents sont ainsi identifiés à partir de leurs contributions respectives à la variabilité du champ d'irradiance global. Les régions les plus obstructives, telles que les agrégats géométriques hauts et denses, sont identifiées.

La distinction des variations saisonnières et journalières dominantes permise par la HOSVD facilite notamment l'analyse de la variabilité temporelle globale. En supposant un arrangement tensoriel rigoureux, une telle approche multilinéaire s'avère particulièrement pertinente pour l'interprétation des variations de signaux multidimensionnels couvrant une multitude d'échelles spatio-temporelles et pouvant rapidement devenir complexes, tels que le champ de rayonnement en milieu urbain. Chaque dimension possédant un nombre spécifique de modes, il devient en outre possible d'appréhender leur prévalence individuelle quant à la variabilité globale du signal. Les diverses interactions entre les modes $\mathbf{v}_{r_i}^{(i)}$, quantifiées par les éléments du noyau $\sigma_{r_1 r_2 r_3}$, conduisent cependant à des interprétations multiples de chaque élément pouvant ainsi compliquer l'analyse globale.

La suite de ce travail serait d'étendre l'approche à des modèles urbains aux propriétés morphologiques et radiatives plus réalistes. Les auteurs explorent actuellement l'hétérogénéité radiative des surfaces, *via* l'intégration de matériaux non-Lambertiens susceptibles de perturber le rayonnement incident (*e.g.* végétation perméable, vitrage spéculaire). Malgré une complication inévitable de l'interprétation globale amenant l'étude au-delà des deux premiers modes, cela permettrait notamment d'examiner les variations actuellement quasi-invisibles du rayonnement diffus. Les dépendances angulaires et spectrales peuvent également être intégrées dans la décomposition, avec des applications potentielles dans l'analyse des îlots de chaleur urbains (ICU). La décomposition simultanée de l'ensemble des surfaces urbaines est actuellement examinée, avec pour objectif l'analyse de la distribution du rayonnement à l'échelle du quartier. L'approche de Tucker est particulièrement utile ici pour rendre compte des diverses échelles spatiales mises en jeu. Des améliorations algorithmiques, comme la rotation des modes extraits ou la diagonalisation du tenseur noyau, constituent d'autres pistes de recherche.

Références

- [1] A. Arias-Rosales and P.R. LeDuc. Urban solar harvesting : The importance of diffuse shadows in complex environments. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 175 :113155, 2023.
- [2] A.A. Tehrani, O. Veisi, B.V. Fakhr, and D. Du. Predicting solar radiation in the urban area : A data-driven analysis for sustainable city planning using artificial neural networking. *Sustain. Cities Soc.*, 100(8) :105042, 2024.
- [3] G.M. Lohmann. Irradiance variability quantification and small-scale averaging in space and time : A short review. *Atmos.*, 9(7) :264–286, 2018.
- [4] M.C. Zarzo and P.C.P. Marti. Modeling the variability of solar radiation data among weather stations by means of principal components analysis. *Appl. Energy*, 88(8) :2775–2784, 2011.
- [5] K.T.N. Ihsan, H. Takenaka, A. Higuchi, A.D. Sakti, and K. Wikantika. Solar irradiance variability around asia pacific : Spatial and temporal perspective for active use of solar energy. *Sol. Energy*, 276 :112678, 2024.
- [6] N. Villefranque, F. Hourdin, L. d’Alençon, S. Blanco, O. Boucher, C. Caliot, C. Coustet, J. Dauchet, M. El Hafi, V. Eymet, O. Farges, V. Forest, R. Fournier, J. Gautrais, V. Masson, B. Piaud, and R. Schoetter. The teapot in a city : A paradigm shift in urban climate modeling. *Sci. Adv.*, 8(27) :eabp8934, 2022.
- [7] G. Le Gall, M. Thebault, C. Caliot, and J. Ramousse. Principal component analysis for the characterisation of spatiotemporal variations of the solar resource in urban environments. In *Proceedings of the 17th International Heat Transfer Conference, Cape Town, South Africa, 14-18 August*, page 11. Begell House Inc., 2023.
- [8] R.L. Tucker. Some mathematical notes on three-mode factor analysis. *Psychometrika*, 31 :279–311, 1966.
- [9] L. De Lathauwer, B. De Moor, and J. Vandewalle. A multilinear singular value decomposition. *SIAM J. Matrix. Anal. Appl.*, 21(4) :1253–1278, 2000.
- [10] I. D. Stewart and T. Oke. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93 :1879–1900, 2012.
- [11] A.Z. Ramírez and C.B. Muñoz. Albedo effect and energy efficiency of cities. In C. Ghenai, editor, *Sustainable Development - Energy, Engineering and Technologies - Manufacturing and Environment*, page 18. InTech, 2012.
- [12] R.J. Hogan and A. Bozzo. Ecrad : A new radiation scheme for the ifs. Technical report, European Centre for Medium-Range Forecasts (ECMWF), Reading, UK, 2016. Available at <http://www.ecmwf.int/en/research/publications>.
- [13] C. Caliot, R. Schoetter, V. Forest, V. Eymet, and T. Chung. Model of spectral and directional radiative transfer in complex urban canopies with participating atmospheres. *Bound.-Layer Meteorol.*, 186 :145–175, 2023.
- [14] R. Schoetter, C. Caliot, T.Y. Chung, and R.J. Hogan. Quantification of uncertainties of radiative transfer calculation in urban canopy models. *Bound.-Layer Meteorol.*, 189 :103–138, 2023.
- [15] I. Reda and A. Andreas. Solar position algorithm for solar radiation applications. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, 2008. Available at <https://www.nrel.gov/docs>.

Remerciements

Ce travail est soutenu par l’Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du projet ‘Investissements d’Avenir [ANR-18-EURE-0016 Solar Academy]. Les auteurs expriment également leur gratitude au groupe de recherche INdAM, dont est membre V. Simoncini, pour leur soutien.