Impact d'une stratégie de morphologie solaire sur le confort d'été

Laila Koubaa Turki*[1], et Abdelkader Ben Saci[2]

[1] Univ. Carthage, ENAU, Equipe de recherche M2A, Sidi Bou Saïd, Tunisie
[2] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, School of Architecture Univ. Grenoble Alpes ENSAG, AAU-CRESSON, 38000 Grenoble, France
***Koubaa.leila@yahoo.fr**

RESUME. Nous cherchons souvent l'accès solaire en hiver pour minimiser les dépenses énergétiques de chauffage et offrir un bien-être solaire. Cette question est traitée par le concept de l'enveloppe solaire[1](Knowles 1980) *depuis les années 70 puis par ses multiples dérivés* (Vartholomaios 2015; Capeluto and Plotnikov 2017; Koubaa Turki 2021).

Nous proposons dans ce papier d'étudier l'impact de la stratégie solaire de morphose[2] des bâtiments sur le confort d'été. Elle consiste à déterminer l'implantation et la forme des constructions en se basant sur le temps de coupure d'ombrage. Il s'agit des périodes d'accès solaire souhaitable. Nous proposons de le défini par un équilibre entre l'irradiation solaire reçue en hiver et celle reçue en été.

Nous générons des enveloppes solaires à l'échelle d'un ilot urbain résilient à la fois l'accès solaire et la densité urbaine.

Ce papier propose donc une méthode de conception des bâtiments et des quartiers qui veut agir en amont de ce processus. L'équilibre énergétique saisonnier, entre confort d'été et accès solaire en hiver, aide à atteindre une haute efficacité énergétique et environnementale du bâti.

MOTS-CLÉS : Equilibre énergétique saisonnier, Temps de coupure d'ombrage, Morphologie urbaine.

ABSTRACT. We often seek solar access in winter to minimize heating energy expenditure and provide solar well-being. This question has been addressed by the concept of the solar envelope (Knowles 1980) since the 1970s and then by its many derivatives (Vartholomaios 2015; Capeluto and Plotnikov 2017; Koubaa Turki 2021).

We propose in this paper to study the impact of the solar strategy of building morphosis on summer comfort. It consists of determining the layout and shape of the constructions based on the shading cut-off time. These are periods of desirable solar access. We propose to define it by a balance between the solar irradiation received in winter and that received in summer.

We generate solar envelopes at the scale of an urban block resiliente to both solar access and urban density.

This paper therefore proposes a method of designing buildings and neighborhoods that wants to act upstream of this process. The seasonal energy balance, between comfort in summer and solar access in winter, helps to achieve high energy and environmental efficiency in buildings.

KEYWORDS: Seasonal energy balance, Shading cut-off-time, Urban morphology.

1 : L'enveloppe solaire est le volume maximal permettant l'ensoleillement des constructions voisines pendant les heures bénéfiques d'ensoleillement en hiver.
2 : Le terme morphose est développé à partir du mot grec morphosis désignant action de donner forme à, mettre en forme (Ben Saci 2000).

1. INTRODUCTION

La notion de droit solaire est apparue à la fin des années 70 par le concept de l'enveloppe solaire décrit par Knowles entre 1968 et 1971 (Knowles 1974; 1980). C'est un concept morphologique qui voulait garantir ce droit, permettre l'accès solaire à un bâtiment sans ombrager les constructions voisines. L'enveloppe solaire décrit les limites volumétriques n'ombrageant pas le voisinage à des moments spécifiques. Ces moments appelés le temps de coupure (cut-off-time), définissent la période pour laquelle l'accès solaire est souhaitable. L'ombrage est inscrit dans une limite spatiale, appelée la clôture d'ombre (Shadow fences), qui définit la frontière de projection de l'ombre de la volumétrie. Le temps de coupure et la clôture d'ombre sont les deux contraintes de définition morphologique de l'enveloppe solaire. Nous avons dressé l'état de l'art des différents travaux portant sur la détermination de ces deux contraintes (Koubaa Turki et al., 2020). Jusqu'en 2020, ces travaux représentent 15% des publications sur l'enveloppe solaire dont 60% sont dédiés pour l'étude du temps de coupure et 40% pour l'étude de la clôture d'ombre.

Nous avons constaté un intérêt pour la détermination du temps de coupure maximisant le gain solaire en hiver. Par contre, peu de recherches proposent d'étudier à la fois les apports énergétiques en hiver et en été (Vartholomaios, 2015 ; Raboudi et al., 2014). Avec la surchauffe climatique, l'impact des apports solaires en été est de plus en plus important. En effet, la climatisation devient souvent nécessaire pour les espaces ayant des apports solaires élevés en été. C'est pourquoi nous proposons la notion d'équilibre énergétique saisonnier des apports entre hiver et été en tenant compte des constructions voisines. L'objectif est de proposer une méthode de conception de morphologies qui assurent un compromis entre les irradiations solaires souhaitables en hiver et celles indésirables en été.

2. DETERMINATION DU TEMPS DE COUPURE DANS L'ETAT DE L'ART

Le temps de coupure est déterminé, initialement, selon les périodes d'insolation utile ou de captage d'énergie solaire. Knowles (1981) a proposé de calculer les périodes utiles d'accès solaire par la pondération du rayonnement solaire, incident à plusieurs moments de la journée, par le sinus de l'angle de l'altitude du soleil. Nous avons répertorié plusieurs recherches de détermination du temps de coupure ; selon les périodes d'insolation utile, gains solaires reçues (Vartholomaios 2015), selon la consommation d'énergie (Bruce 2008). Le temps de coupure était déterminé aussi selon le confort thermique de l'espace extérieur (Sorayaei et Sorayaei 2017) ou celui de l'espace intérieur (Capeluto and Plotnikov 2017). Trois quarts des études de détermination du temps de coupure s'intéressent au captage solaire. En effet, l'avancée des modèles de calcul énergétique notamment Radiance (Ward 1994) et Energyplus (Crawley et al. 2001) ont permis d'affiner la détermination du temps de coupure selon le captage d'énergie (Capeluto et al. 2006; Capeluto et Plotnikov 2017; Raboudi et Ben Saci 2014; Vartholomaios 2015; Koubaa Turkiet al. 2018).

La plupart des études de détermination du temps de coupure se focalisent sur l'accès solaire souhaitable en hiver. Cependant, cette période correspond à des heures de surchauffe en été. Niemasz et al. (2013) ont étudié l'application de l'enveloppe solaire sur des terrains situés dans sept villes de l'Amériques du Nord. Les auteurs ont évalué la consommation énergétique de ces enveloppes. Ils ont remarqué que ce modèle présente un avantage sur la consommation énergétique pour le chauffage contre un déficit considérable pour les climats nécessitant des charges de refroidissement.

D'où la question : Quelle serait la période d'accès solaire optimale en hiver et en été et non seulement pendant la période d'hiver ? Nous proposons, dans cette recherche, de maximiser l'irradiation solaire directe reçue en hiver et à minimiser l'irradiation solaire directe reçue en été.

3. METHODE PROPOSEE DE DETERMINATION DU TEMPS DE COUPURE D'OMBRAGE

Pour définir le temps de coupure d'ombrage, noté To, nous calculons les irradiations solaires directes reçues par heure pour une série d'orientations de façades, notées Rd_h et Rd_e, respectivement pendant les trois mois d'hiver (de Décembre à Février) et d'été (de Juin à Septembre). Nous proposons un pas de rotation de ces façades de 22.5° à partir du Nord. La position 0° indique la façade Nord et la position 180° indique la façade Sud. Le calcul est effectué sur un mètre carré de façade.

Nous calculons l'irradiation solaire directe reçue pendant l'hiver par heure du lever au coucher du soleil sur les différentes orientations. En se basant sur le principe de Pareto[3] (1965), nous proposons que la période de temps retenue en hiver soit autour de 20% des heures de la journée qui correspondent au moins à 80% de l'irradiation totale (Koubaa Turki et al. 2018). Nous cherchons la plage horaire qui assure ce pourcentage de l'apport solaire journalier en hiver pour l'ensemble des orientations tel que :

$$\sum Rd_h \text{ To} \geq 80\ \% \sum Rd_h \text{ journalier de la période d'hiver (1).}$$

Nous calculons l'irradiation solaire directe reçue en été pendant les plages satisfaisant cette condition en hiver sur les différentes orientations.

Nous proposons un coefficient, noté Q, qui caractérise le rapport de ces deux irradiations et qualifie la relation de l'irradiation solaire directe reçue en hiver et en été. Il est calculé par le rapport entre la somme de l'irradiation solaire directe reçue par les façades en hiver et la somme de l'irradiation solaire directe reçue par les façades en été durant une plage de temps de coupure d'ombrage satisfaisant la précédente condition (1) avec :

$$Q = \sum Rd_{h\ to} / \sum Rd_{e\ ti} \text{ tel que } \sum Rd_h \text{ To} \geq 80\ \% \sum Rd_h \text{ journalier (2)}$$

Nous choisissons le temps de coupure d'ombrage qui présente un coefficient maximal correspondant à un taux d'irradiation solaire important en hiver et faible en été. Nous nommons ce rapport le coefficient d'équilibre des irradiations solaires entre l'hiver et l'été.

4. EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS

4.1. PRESENTATION DU TERRAIN D'EXPERIMENTATION

Nous présentons l'exemple d'application sur deux parcelles situées dans la Rive gauche de Paris, secteur Bruneseau (Figure 1). Nous avons choisi ce site parce qu'il présente un projet de réinvention de terrains industriels en nouveaux quartiers mixtes rassemblant logements, bureaux et activités, commerces, services, écoles, équipements publics et culturels. L'opération propose des immeubles en hauteur en préservant le patrimoine industriel remarquable avec une préoccupation environnementale forte. Parmi les enjeux environnementaux, celui qui porte sur la réduction de l'empreinte carbone dans le processus de construction des bâtiments prend une place particulière.

3: La loi de Pareto décrit un phénomène empirique constaté dans certains domaines : environ 80 % des effets sont le produit de 20 % des causes (Pareto, 1967).

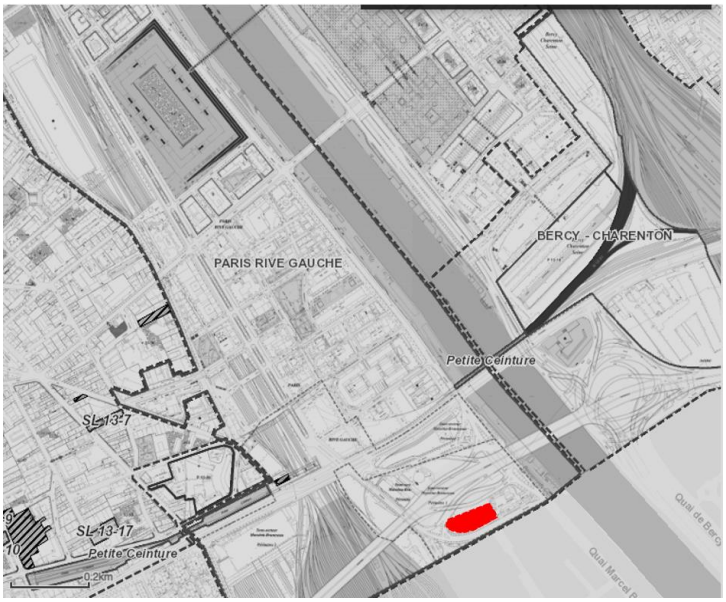

Figure 1. (a) Plan de situation de l'îlot de l'expérimentation situé à la Rive gauche de Paris (Latitude = 48.824381 N – Longitude = 2.386429 E).

L'îlot choisi s'inscrit dans la zone B2B du quartier Bruneseau-Nord. Il s'agit d'un îlot à usage mixte comportant des logements, des bureaux et des commerces dont la date de livraison est prévue après 2025. Il s'agit de deux parcelles que nous nommons ici A et B (Figure 2).

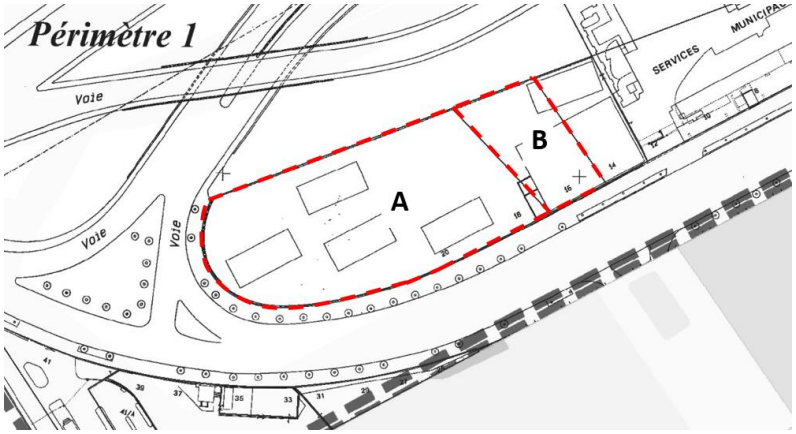

Figure 2. Plan cadastral des deux parcelles A et B situées au quartier Bruneseau-Nord (Echelle 1/2000).

4.2. DETERMINATION DU TEMPS DE COUPURE D'OMBRAGE

Nous calculons la somme des irradiations solaires directes reçues par m^2 sur le site par heure pour l'ensemble des façades de référence constituées par rotation des façades d'un pas de 22.5° par Insight[4] de Revit (Figure 3).

4 : Insight est un module de calcul énergétique dans Revit alimentée par Studio de bâtiment vert, un moteur DOE-2.2 exécuté dans le cloud et testé par rapport à la norme ANSI/ASHRAE 140.

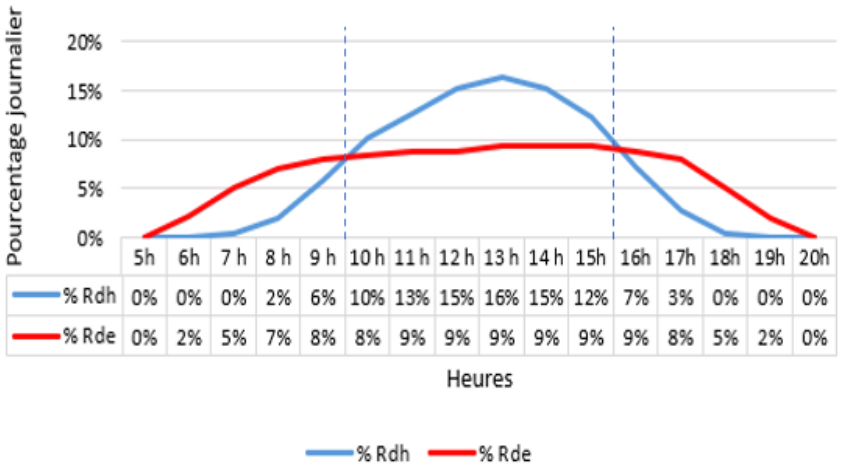

Figure 3. Pourcentage reçue de l'irradiation reçue par rapport à la somme journalière en hiver et en été sur un mètre carré de façade pour différentes orientations avec un pas de 22.5° à la Rive gauche de Paris.

Nous constatons alors que, de 6h à 9h et de 16h à 19h les irradiations solaires directes reçue en hiver sont négligeables par rapport à l'irradiation totale.

Nous calculons la somme cumulative d'irradiation solaire reçue pour plusieurs plages de temps de coupure d'ombrage en hiver et la somme cumulative correspondante en été. Nous en déduisons les pourcentages par rapport à la somme journalière et le rapport Q (Figure 4).

Le pourcentage cumulé de l'irradiation de 10h à 15h est de 81.5% par rapport à la somme totale de l'irradiation reçue en hiver contre 53.97% par rapport à la somme totale de l'irradiation reçue en en été. Nous proposons de fixer le temps de coupure d'ombrage à cette plage To = [10h, 15h]. Cette durée correspond à 25% des heures de la journée. Pour cette période, le rapport Q est de 0,56. Il s'agit du rapport maximal satisfaisant la condition requise d'accès solaire en hiver et correspondant au minimum d'apport solaires en été.

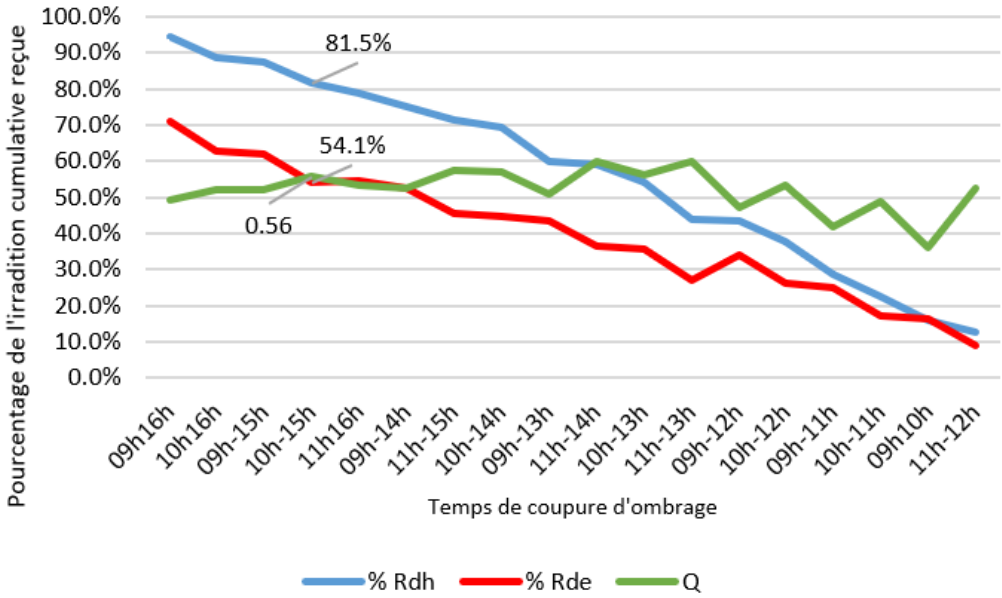

Figure 4. Pourcentage de l'irradiation cumulative reçue en hiver et en été sur un mètre carré de façade par rapport à la somme journalière pendant différentes plages de temps de coupure d'ombrage.

4.3. GENERATION ET CARACTERISATION DES ENVELOPPES SOLAIRES

Les enveloppes solaires sont générées en découpant le volume d'extrusion verticale de la parcelle en fonction de la direction des rayons solaires pendant le temps de coupure d'ombrage et la clôture d'ombre. Ceci est fait par une opération booléenne d'intersection entre le volume extrudé, selon la direction solaire, du polygone de la clôture d'ombre et celui de la parcelle. Pendant le temps de coupure d'ombrage de la façade A, celle-ci reçoit un maximum d'irradiation solaire alors que la façade B d'en face ne projette pas d'ombrage sur la façade irradiée et inversement.

Nous proposons un algorithme écrit sur Dynamo pour la génération de l'enveloppe solaire. Le programme permet de détecter les limites des parcelles importées de Revit et la génération de l'enveloppe solaire pour chaque variation de temps de coupure d'ombrage. Il calcule les deux indicateurs de densité le FAR[5] et le FSI[6] des différentes solutions morphologiques à partir de la variation du temps de coupure d'ombrage pour chaque parcelle. Ceci permet d'expliciter la relation entre le temps de coupure d'ombrage et la densité. La hauteur des bâtiments est un paramètre de sortie à optimiser.

Nous examinons les résultats en cherchant à maximiser le FAR et la durée d'accès solaire par l'étude des différentes solutions en variant le temps de coupure d'ombrage.

Le diagramme suivant (Figure 5) représente les interrelations entre les différents paramètres de cette méthode. Il croise les dimensions T_1 et T_2 de différentes combinaisons de début et de la fin du temps de coupure d'ombrage [10,15] avec la durée d'ensoleillement résultante et les résultats effectifs de FAR et FSI des morphologies générées. Le croisement par produit vectoriel permet d'obtenir 441 variantes.

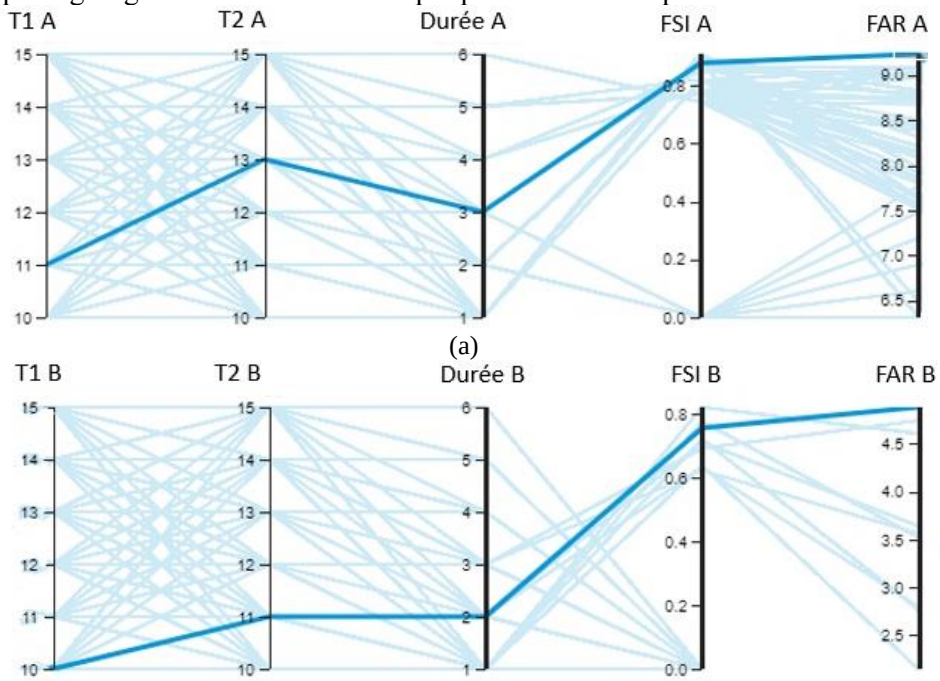

Figure 5. Solutions obtenues pour (a) la parcelle A et (b) la parcelle B correspondant à un maximum de FAR et de durée de temps de coupure d'ombrage.

5 : Foor Space Area est un coefficient d'utilisation foncière. C'est le rapport entre les surfaces des planchers et la surface du terrain.

6 : Floor Space Index est un coefficient d'occupation au sol est le rapport entre la surface constructible au sol et la surface du terrain.

Sur le diagramme, il est facile d'observer les solutions obtenues pour un maximum de FAR et de temps de coupure d'ombrage pour chaque parcelle.

Nous examinons les résultats des deux études où les objectifs sont de (1) maximiser la durée d'accès solaire en hiver et (2) maximiser le FAR.

Pour une durée maximale d'accès solaire (Tableau 1), la parcelle B peut recevoir 5 heures d'ensoleillement de 10h à 14h avec un FAR de 3.744. Cependant, la parcelle A peut garantir 6 heures d'accès solaire au maximum de 10h à 15h pour un FAR de 7.684 soit un gain de 51.27% par rapport à B. Pour une heure moins d'accès solaire, la parcelle A présente un gain en FAR de 3.7% (7.986) de 11h à 15h.

Parcelle	**A**	**B**
FAR	7.684	3.744
FSI	4.548	3.255
DUREE	6	5
To	[10h,15h]	[10h,14h]

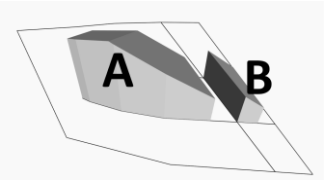

Tableau 1. Résultats pour un maximum de durée d'accès solaire pour les deux parcelles.

La parcelle A est une parcelle d'angle. Sa situation lui permet d'étaler les clôtures d'ombre du côté Nord, Est et Sud. Ceci lui permet d'aller encore plus en hauteur et d'augmenter son FAR.

Dans un objectif de densification urbaine comme il peut se présenter dans une ville comme Paris, la meilleure solution ayant un maximum de FAR pour les deux parcelles est représentée par le Tableau 2.

Parcelle	**A**	**B**
FAR	7.986	4.345
FSI	4.704	4.514
DUREE	5	3
To	[11h,15h]	[10h,12h]

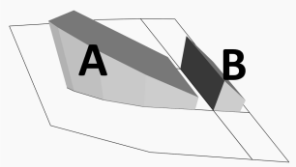

Tableau 2. Résultats pour un maximum de FAR pour les deux parcelles.

Le FAR maximal de la parcelle A (7.986) correspond à un temps de coupure d'ombrage [11h,15h]. Le FAR maximal de la parcelle B (4.345) correspond à un temps de coupure d'ombrage [10h,12h]. La parcelle A gagne 45.6% en FAR par rapport à la parcelle B.

Pour une équité de 5 heures d'accès solaire, la parcelle B réduit son FAR (3.744) de 13.83%. Ainsi se pose une question d'arbitrage.

Nous calculons l'énergie reçue hiver et en été par les enveloppes des deux parcelles représentant un maximum de FAR et un maximum de durée pendant le temps de coupure d'ombrage (tableau 3).

		Rd_h	Rd_e	Q
Max FAR	**Parcelle A**	71	131	0.541
	Parcelle B	49	113	0.433
Max Durée	**Parcelle A**	69	135	0.511
	Parcelle B	44	100	0.44

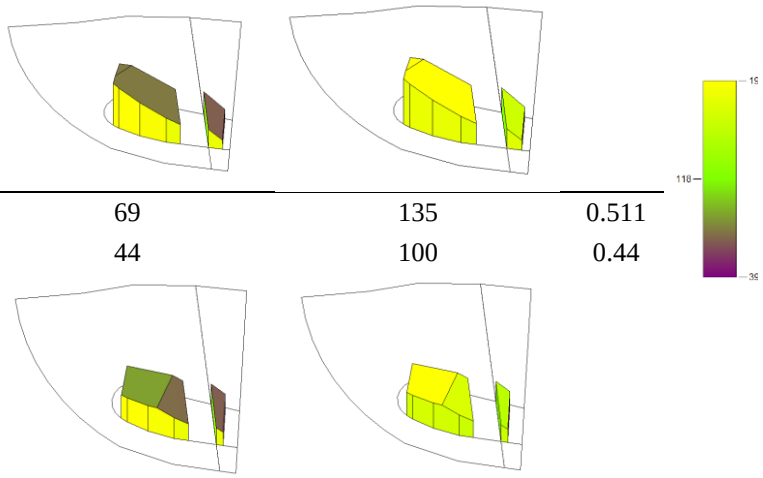

Tableau 3. Energie solaire reçue par les enveloppes en hiver et en été pendant le temps de coupure d'ombrage (kWh/m²).

Pour la variante donnant un maximum de FAR, la parcelle A présente un gain en énergie reçue en hiver 30.9% et 13.7% en été par rapport à la parcelle B.

Pour la variante donnant un maximum de FAR, la parcelle A présente un gain en énergie reçue en hiver 36.2% et 25. 9% en été par rapport à la parcelle B.

Nous remarquons que le coefficient d'équilibre de la parcelle A est meilleur que la parcelle B. La variante produisant un maximum de FAR est meilleure pour la parcelle A avec un Q de 0.541. Cependant, pour la parcelle B, la variante proposant un maximum de durée présente un meilleur bilan énergétique avec Q= 0.44.

5. DISCUSSION ET CONCLUSION

Cet article vise à améliorer la détermination du temps de coupure d'ombrage. Nous proposons de le définir par un équilibre entre l'irradiation solaire reçue en hiver et celle reçue en été. La méthode proposée de détermination du temps de coupure d'ombrage aide à ajuster la morphologie de l'enveloppe aux conditions climatiques et aux besoins d'accès solaire des constructions selon le contexte climatique du projet.

L'objectif de cette approche est d'exploiter le potentiel morphologique de chaque parcelle. La position, la forme et la taille de la parcelle impactent le FAR et la durée d'accès solaire. La variation de la période du temps de coupure d'ombrage permet de manipuler la densité urbaine tout en garantissant l'accès solaire sur une plage horaire d'accès solaire utile. La parcelle A présente de meilleurs résultats en densité et en accès solaire que la parcelle B. C'est dû au fait que la parcelle A est située à l'angle donnant sur de grands boulevards. Ceci lui permet un l'étalement de sa clôture d'ombre plus important que celle de la parcelle B.

L'approche proposée permet de garantir une meilleure utilisation de la ressource solaire sur les enveloppes des bâtiments. Nous avons calculé ici la ressource solaire a posteriori. Cependant, nous pouvons considérer cette variable comme un paramètre pour sélectionner la meilleure morphologie urbaine. L'étude du maximum de FAR et d'énergie reçue selon le temps de coupure d'ombrage permet

d'obtenir les solutions optimales de chaque parcelle. L'approche multi-objectifs serait nécessaire dans ce cas.

Nous proposons en perspectives d'affiner la détermination du temps de coupure d'ombrage selon l'usage et la consommation énergétique pour ajuster la morphologie de l'enveloppe solaire optimale aux besoins réels du bâtiment. Par exemple, dans l'hypothèse d'installation de dispositifs de captage énergétique, si l'intervalle du temps de coupure d'ombrage permet d'atteindre des valeurs d'énergie qui excèdent les besoins d'une construction, le temps de coupure d'ombrage pourrait être réduit au profit du voisin.

6. BIBLIOGRAPHIE

Bruce, Giles. 2008. "High Density, Low Energy : Achieving Useful Solar Access for Dublin's Multi-Storey Apartment Developments." In *Proceedings of PLEA2008 Conference*. Dublin.

Capeluto, I.G., and Boris Plotnikov. 2017. "A Method for the Generation of Climate-Based, Context-Dependent Parametric Solar Envelopes." *Architectural Science Review* 60 (5): 395–407. https://doi.org/10.1080/00038628.2017.1331334.

Capeluto, I.G., Abraham Yezioro, Tamar Bleiberg, and Edna Shaviv. 2006. "Solar Rights in the Design of Urban Spaces." In *Proceedings of PLEA2006 Conference*. Geneva, Switzerland.

Crawley, Drury, Linda K Lawrie, Frederick Winkelmann, W Buhl, Y. Huang, Curtis O Pedersen, Richard K Strand, et al. 2001. "EnergyPlus : Creating a New-Generation Building Energy Simulation Program." *Energy and Buildings* 33 (4): 319–31. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6.

Knowles, Ralph. 1974. *Energy and Form : An Ecological Approach to Urban Growth*. Massachusetts: MIT Press.

Knowles, Ralph. 1980. "The Solar Envelope," 1980. http://www-bcf.usc.edu/~rknowles/sol_env/sol_env.html.

Knowles, Ralph. 1981. *Sun Rhythm Form*. Cambridge: MIT Press.

Koubaa Turki, Laila. 2021. "Modèle Paramétrique d'optimisation Des Contraintes de l'enveloppe Solaire." Thèse de doctorat, Université de Carthage.

Koubaa Turki, Laila, Khaoula Raboudi, and Abdelkader Ben Saci. 2018. "Stratégies de Prospect Du Droit Solaire Par l'immersion." In *Immersion - Émersion et Conception de Projets Architecturaux et Urbains : Actes Du 8ème Séminaire de Conception Architecturale Numérique. Actes de SCAN 18*, edited by edp sciences, 47:1–11. Nantes: SHS Web of conferences proceedings.

Koubaa Turki, L., Raboudi, K., & Ben Saci, A. (2020). L'enveloppe solaire : un retour vers le futur. In *edp sciences (Ed.), Culture numérique et conception architecturale: Retour vers le future: Actes du 9ème Séminaire de Conception Architecturale Numérique. Actes de SCAN 20* (Volume 82, 2020).SHS Web of conferences proceedings.

Niemasz, Jeffrey, Jon Sargent, and Christoph F. Reinhart. 2013. "Solar Zoning and Energy in Detached Dwellings" *Environment and Planning B: Planning and Design* 40 (5): 801–13. https://doi.org/10.1068/b38055.

Pareto, V. (1965) « Essai sur la courbe de la répartition de la richesses », *dans Recueil publié par la faculté de droit à l'occasion de l'exposition nationale suisse, Genève, Université de Lausanne, 1896* ; réédité dans Vilfredo Pareto, Écrits sur la courbe de répartition de la richesses, Genève, Droz, 1965

Raboudi, Khaoula, and Abdelkader Ben Saci. 2014. "Génération de Volumes de Contrôle Solaire." In *Interaction(s) Des Maquettes Numériques : Acte Du 6ème Séminaire de Conception Architecturale Numérique. Actes de SCAN'14*, 221–31. Luxembourg: Presses universitaires de Nancy. https://www.researchgate.net/publication/265376934_Gnration_de_volumes_de_contrle_solaire.

Sorayaei, Tohid, and Zahra Sorayaei. 2017. "An Integrated Approach to Climate Conscious Urban Design Using Solar Envelope Concept." *Palma Journal* 16 (3): 322–30.

Vartholomaios, Aristotelis. 2015. "The Residential Solar Block Envelope : A Method for Enabling the Development of Compact Urban Blocks with High Passive Solar Potential." *Energy and Buildings* 99 (July): 303–12. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.046.

Ward, Gregory J. 1994. "The Radiance Lighting Simulation and Rendering System." In *Proceedings of SIGGRAPH Conference*, 459–472. SIGGRAPH '94. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/192161.192286.