

Calcul des flux solaires pour le Bâtiment par méthode de Ray-Tracing

David JOSEPH^{1*}, Delfin BRAGA¹, Jean-Patrick ROCCIA¹, Édouard GENGEMBRE²,

Antoine THUILLIER², Bruno LADEVIE³, Jean-Jacques BEZIAN³

¹ High Performance Computing – Simulation Acceleration,
3 Chemin du Pigeonnier de la Cépière, Bât. C, 31100 Toulouse

² TBC Générateur d'Innovation,
Bâtiment Platon, 25 Bd Victor Hugo, 31770 Colomiers

³ Ecole des Mines d'Albi-Carmaux,
Campus Jarlard, 81013 ALBI CT Cedex 09

* (auteur correspondant : joseph@hpc-sa.com)

Résumé - La simulation des flux solaires énergétiques reçus sur un bâtiment a été implémentée dans le logiciel d'aide à la conception de bâtiment économe, ArchiWIZARD Esquisse. Les techniques d'accélération de lancer de rayons issues du domaine de l'imagerie de synthèse permettent de modéliser simultanément l'ensemble des postes de récupération énergétique concernés (apports solaires, panneau solaire thermique et photovoltaïque). Les résultats obtenus par ArchiWIZARD Esquisse sont confrontés à ceux d'autres logiciels du domaine et à des données recueillies sur site.

Nomenclature

P_u Production énergétique utile, Wh
 Q Densité surfacique d'énergie, $Wh.m^{-2}$
 η_{syst} Rendement du système
 E Erreur relative %

Indices et exposants
 hz sur le plan horizontal
 $inc.$ sur le plan d'incidence

1. Introduction

Dans le contexte actuel lié aux nouvelles préoccupations environnementales et aux solutions que propose le bioclimatique, des études plus approfondies sur la demande énergétique des bâtiments devront être effectuées.

Une bonne définition des besoins énergétiques nécessite une connaissance juste des flux solaires reçus par l'enveloppe externe de l'édifice et son environnement. Le rayonnement thermique, absorbé par les parois opaques ou transmis à travers les baies, constitue un apport solaire qui a un impact direct sur la réduction des déperditions énergétiques du bâtiment en hiver. Il contribue fortement à l'accroissement du besoin de refroidissement nécessaire pour le confort d'été. Il constitue également une ressource énergétique alternative pour le bâtiment grâce aux panneaux photovoltaïques et thermiques pouvant répondre en partie aux besoins en électricité et en production d'eau chaude sanitaire. La complexité d'un bâtiment dans son environnement réel (murs opaques, baies transparentes, protections solaires, masques proches et lointains) est telle qu'une modélisation complète et fiable des flux solaires reçus requiert la mise en œuvre d'une méthodologie adaptée.

Dans ArchiWIZARD Esquisse [1], la modélisation des flux solaires énergétiques ($W.m^{-2}$) et lumineux (lux) se fait par méthode de lancer de rayon ou « Ray-Tracing ». Le lancer de rayons permet alors de simuler la propagation rectiligne et isotrope du rayonnement solaire dans une scène intégrant le bâtiment et son environnement proche, et de détecter les éventuels masquages (obstacles rencontrés). Le bâtiment et son environnement sont représentés par un

modèle 3D constitué d'un ensemble de triangles ayant des propriétés optiques permettant d'altérer la propagation d'un rayon par réflexion spéculaire et/ou diffuse (paroi opaques) ou par transmission et/ou réfraction (milieu transparent tel qu'un vitrage de baie). L'utilisation de la librairie *RayBooster* [2], issue de la recherche dans le domaine de l'imagerie de synthèse, permet d'effectuer les calculs d'intersection de rayons très rapidement. Les gains en performances qu'offre cette librairie autorisent le calcul simultané et en temps réel des éclairagements reçus sur les parois opaques, les vitrages, les panneaux photovoltaïques et thermiques, et même sur des outils de mesure ponctuelle utiles pour le dimensionnement du projet. Cette méthode est également employée dans le visible pour les calculs d'éclairage naturel et artificiel.

2. Méthodologie

2.1. Le lancer de rayons

Le lancer de rayons est une méthode mathématique de simulation d'ondes, basée sur les lois de la propagation dans un milieu en 3 dimensions. Le principe du lancer de rayons consiste à suivre la propagation d'une onde lumineuse dans le sens inverse, et de détecter les éventuels obstacles rencontrés. En général, propager un rayon ne se limite pas à rechercher son premier impact. Une fois le premier impact trouvé, ce rayon peut poursuivre sa vie de différentes façons, selon les caractéristiques de la surface impactée. Les possibilités dans la nature sont infinies, cependant en général on se limite à 3 phénomènes distincts, que l'on combinera parfois : la réflexion spéculaire ou diffuse, la transmission ou réfraction en optique (dans le domaine du bâtiment, la plupart des propagations ayant lieu dans l'air, on néglige les variations angulaires dépendant des vitesses de propagation dans les milieux traversés).

2.2. Méthode d'accélération du lancer de rayon

Que ce soit en thermique ou dans le domaine de l'image de synthèse, le lancer de rayon repose sur un algorithme simple qui consiste à lancer un rayon à partir d'un élément de surface A, d'obtenir le premier point d'impact dans la scène tridimensionnelle considérée et d'en déduire l'élément de surface B auquel il appartient. Une fois cet élément de surface identifié, de nouveaux rayons peuvent être lancés à partir de ce nouvel élément B vers les sources lumineuses afin d'accéder à d'éventuelles autres informations (réflexions, transparence, etc.) qui permettront de déterminer la luminance totale partant de l'élément de surface B qui est reçu par l'élément de surface initial A. Pour des raisons de complexité de calcul, l'algorithme ne se base pas sur le comportement réel des sources afin d'éviter de générer un grand nombre de rayons qui ne contribuent pas à l'évaluation de la réception totale sur l'élément ciblé. En imagerie de synthèse, le constat a été fait qu'une requête d'intersection entre un rayon et une primitive géométrique représente aisément 90% du temps d'exécution, d'où la nécessité de l'optimiser. Chaque rayon lancé étant vecteur d'information, le gain en temps d'exécution peut facilement être traduit en un gain en précision. Pour gagner en performance sur cet algorithme, il faut d'une part améliorer le calcul d'intersection rayon/triangle [1] et d'autre part réduire le nombre de requêtes d'intersections à exécuter. Dans cet optique de réduction du nombre de requêtes, les « structures d'accélération » permettent de cibler rapidement les zones ayant les plus fortes probabilités d'être intersectées par les rayons afin d'éviter des tests systématiques d'intersection de ces rayons sur l'ensemble des éléments de surface d'un modèle traité. Plusieurs types de structures d'accélération se sont succédés dans le monde du lancer de rayons (BSP, Octree, BIH, grille, kd-Tree, BVH, etc.) Aucune ne s'est vraiment imposée comme la structure à privilégier dans tous les cas.

Toutefois, la quasi-totalité des travaux actuels se concentrent sur les trois structures suivantes : grille régulière [2], kd-tree [3,4] et BVH [5]. Le choix du type de structure d'accélération doit être fait après évaluation de plusieurs critères : le temps de construction, la compacité mémoire, le temps de traversée, le gain final en terme d'accélération du lancer de rayon (i.e. : réduction du nombre de tests).

Par ailleurs, les rayons étant indépendants les uns des autres, l'algorithme du lancer de rayons se prête bien à la parallélisation. Au lieu de traiter les rayons un à un séquentiellement, les traiter parallèlement permet d'augmenter significativement les performances.

3. Applications pour la thermique du bâtiment

Le moteur de calcul des flux solaires d'ArchiWIZARD Esquisse a été testé sur des configurations académiques. Nous présentons les résultats obtenus dans le cadre d'une procédure de comparaison avec le benchmark BESTEST. La même méthodologie d'évaluation des flux reçus par un élément de surface est utilisée pour calculer la production énergétique d'un panneau photovoltaïque ou l'énergie solaire récupérée par un panneau solaire thermique. Une confrontation à l'expérience in-situ a pu être menée sur la production énergétique de la ferme photovoltaïque d'une maison individuelle.

3.1. Apports solaires (benchmark BESTEST)

Le programme « chauffage et rafraîchissement solaire des bâtiments » a abouti à la définition d'une procédure de test BESTEST, permettant la comparaison d'outils de simulation numérique de la thermique du bâtiment sur des configurations types. Cette procédure, définie dans la norme ANSI/ASHRAE 140-2001 [6], spécifie des protocoles permettant l'évaluation des capacités techniques de nombreux codes de calcul de la thermique des bâtiments. Les apports solaires pris en compte dans le bilan thermique d'un bâtiment sont liés aux flux solaires reçus sur son enveloppe externe. Il est donc nécessaire d'effectuer une estimation de qualité de ces éclairagements. Le cas de base (Case 600) a été simulé sur le logiciel ArchiWIZARD Esquisse. Ce cas de base correspond à un bâtiment parallélépipédique (8m x 6m x 2.7m), avec 12 m² de fenêtres orientées au sud. Le bâtiment est soumis à un scénario annuel d'ensoleillement établi à partir des données climatiques fournies avec la norme (fichier DRYCOLD.TMY). Les capteurs solaires disponibles dans ArchiWIZARD Esquisse donnent accès au flux solaire annuel reçu sur un plan. Le tableau ci-après présente les valeurs calculées par 5 capteurs solaires positionnés sur les 5 murs exposés du bâtiment (toiture, mur SUD, mur EST, mur NORD et mur OUEST) et les compare à celles qu'ont obtenues les autres logiciels du même type qui ont été évalués sur ce benchmark.

Les flux énergétiques annuels calculés par « Ray-Tracing » dans ArchiWIZARD Esquisse peuvent être considéré comme correct à moins de 10% d'erreur excepté pour le mur Ouest. Une analyse du scénario de flux solaire global contenu dans le fichier DRYCOLD.TMY confirme que l'ensoleillement annuel reçu durant les 12 premières heures de chaque journée est nettement plus important que celui reçu en fin de journée. Ceci explique le résultat obtenu par ArchiWIZARD Esquisse et le code de calcul SERIRES développé par le Solar Energy Research Institute.

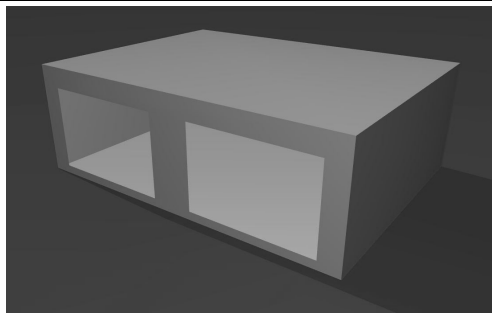
	TOIT (kWh/m ²)	SUD (kWh/m ²)	EST (kWh/m ²)	NORD (kWh/m ²)	OUEST (kWh/m ²)
ESP	1797	1456	959	427	1086
DOE	1831	1566	1155	434	1079
SRES/SUN	1832	1476	1083	456	1003
S3PAS	1832	1474	1082	457	1002
TRNSYS	1832	1522	1101	367	1012
TASE	1832	1468	962	453	1090
SERIRES (SUNCODE)	1832	1468	1217	407	856
ArchiWIZARD Esquisse	1826	1440	1132	393	864
Ecart à la moyenne (%)	0%	-3%	+5%	-8%	-15%

Tableau 1 : Flux énergétique annuel reçu sur chacune des 5 parois du bâtiment en kWh/m²

En positionnant verticalement le capteur solaire Nord à 10 m au nord du bâtiment, en dehors de la zone d'ombrage que celui-ci génère, on mesure un flux énergétique annuel de 465 kWh/m², soit un écart de +72 kWh/m² par rapport à la même mesure de ce capteur placé sur le mur NORD. Cet écart résulte de la prise en compte du rayonnement diffus réémis par le sol qui varie en fonction des phénomènes de masquage du sol par le bâtiment. Ceci pourrait expliquer les écarts observés sur ces résultats comparatifs entre les différents logiciels et confirme la qualité des résultats obtenus par SERIRES, TRNSYS et ArchiWIZARD Esquisse et démontre le gain en précision qu'apporte le lancer de rayon en intégrant les phénomènes de réflexion et de diffusion.

3.2. Panneaux photovoltaïques

Le cas test est le cas de la maison de M. Lauvray, à La Bastide-de-Lordat, près de Pamiers (Ariège). Le pan de toiture centrale inclinée à 20° et orientée plein Sud est recouvert d'une ferme photovoltaïque composée de 30 panneaux Kyocera KC120 ayant une surface unitaire de 1,02 m². Ce type de panneaux dispose d'une efficacité de 11,8% pour une puissance nominale de 120Wc. L'ensemble de ces panneaux sont raccordés à 2 onduleurs SonyBoy 1700 SMA d'une puissance maximale de 2050 watts d'un rendement de 93,5%. Les données de production énergétique mensuelle délivrée en sortie du système complet sont disponibles sur le site internet de M. Lauvray [7].

Il existe de nombreux logiciels proposant le dimensionnement d'un système photovoltaïque.

Nous avons pu identifier celui qui semble le plus complet et est à juste titre le plus utilisé par les industriels et bureaux d'études en photovoltaïque. Sur ce cas test, il sera notre logiciel de référence pour les méthodes de calculs de puissance délivrée par le système photovoltaïque.

ArchiWIZARD Esquisse et le logiciel référence sont capables de gérer les fichiers au format TMY2. Ceci permet d'éviter les flous sur l'impact réel des données d'entrée sur la solution pour un test comparatif. La station météorologique disponible la plus proche est celle de Pamiers, nous utiliserons cette station pour les simulations dont les résultats sont présentés au tableau 2.

SITE			SIMULATION					
Maison Louvray			Logiciel référence			ArchiWIZARD Esquisse		
	Année 2007	Année 2008	Q _{hz} (kWh/m ²)	Q _{inc.} (kWh/m ²)	P _u (kWh)	Q _{hz} (kWh/m ²)	Q _{inc.} (kWh/m ²)	P _u (kWh)
	P _u (kWh)	P _u (kWh)						
Janvier	208	188	45,8	65	185	45,5	62	168
Février	209	346	62,7	80	231,7	62,8	78	211
Mars	342	301	106,7	127	361,9	106,2	123	324
Avril	459	463	136,5	146	415,9	134,8	143	374
Mai	431	459	170,2	171	476,1	168,5	170	434
Juin	487	472	185,6	183	499,6	183,5	182	455
Juillet	507	511	197,2	196	534,5	194,9	194	485
Août	457	440	170,8	178	487,7	169,3	176	439
Septembre	433	394	127,6	147	404,9	126,4	142	360
Octobre	321	314	87,3	109	302,1	87,1	105	271
Novembre	232	166	50,3	69	195,5	50,4	66	177
Décembre	233	159	39,9	59	167,5	40,7	56	155

Tableau 2 : Comparaison des productions utiles mensuelles de l'installation photovoltaïque relevées sur site et simulées

ArchiWIZARD Esquisse / REFERENCE	E Q, hz	0,83%
	E Q, inc.	2,67%
	E P, u	9,50%
ArchiWIZARD Esquisse / IN-SITU 2007	E P, u	12,43%
ArchiWIZARD Esquisse / IN-SITU 2008	E P, u	10,20%
REFERENCE / IN-SITU 2007	E P, u	9,88%
REFERENCE / IN-SITU 2008	E P, u	9,98%

Tableau 3 : Erreurs relatives moyennes annuelles calculées sur les valeurs mensuelles du tableau 2

La comparaison des flux énergétiques annuels reçus sur un plan horizontal et sur un plan d'incidence incliné à 20° nous permet de valider la méthodologie de calcul des éclairagements énergétiques simulés par « Ray-Tracing » et implémentés dans ArchiWIZARD Esquisse. On constate que le coefficient de rendement énergétique joue un grand rôle et que son ajustement est nécessaire. Le logiciel référence donnant la possibilité de sélectionner les modèles exacts de panneau et d'onduleur dans la base de données constructeur, le coefficient de rendement énergétique global du système $\eta_{\text{sys}} = P_u/Q_{\text{inc.}}$ devrait être plus fiable. Il est de 0,085 selon le

modèle générique utilisé dans ArchiWIZARD Esquisse alors qu'il a été évalué à 0,091 pour le logiciel référence.

4. Conclusion

Nous avons pu comparer la production réelle mesurée sur l'installation photovoltaïque d'une maison individuelle à celle obtenue par simulation sur ArchiWIZARD Esquisse. Le logiciel offrant la possibilité de modéliser les masques environnant observés sur le site, ce même travail peut être effectué en amont d'un projet pour déterminer le positionnement optimal de la ferme photovoltaïque. L'accès à une information de qualité sur les flux radiatifs reçus par l'enveloppe extérieure permet également d'envisager la prise en compte du couplage entre les contraintes externes et le bâti. Actuellement, la prise en compte des conditions climatiques réelles auxquelles sont confrontés les bâtiments est souvent limitée aux seules données des stations météorologiques sans représentation des interactions du bâtiment avec son environnement immédiat (altération du micro-climat environnant, masquage urbain).

Références

- [1] ArchiWIZARD Esquisse, <http://www.raycreatis.com/>
- [2] G. Cadet, Accélération de la Requête d'Intersection par la Réorganisation des Rayons, Thèse SUPAERO, Toulouse (2008)
- [3] T. Möller, B. Trumbore, Fast, minimum storage ray triangle intersection, *JGT*, 2(1): 21-28, (1997).
- [4] A. Fujimoto, T. Tanaka, and K. Iwata., ARTS: Accelerated Ray-Tracing System, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 6(4), 16-26 (1986).
- [5] V. Havran, Heuristic Ray Shooting Algorithms, PhD thesis, Czech Technical University (2000).
- [6] I. Wald, and V. Havran, On building fast kd-trees for ray tracing and on doing that in $O(N \log N)$, *Proceedings of the 2006 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*, 61-69 (2006).
- [7] I. Wald, S. Boulos, and P. Shirley, Ray Tracing Deformable Scenes Using Dynamic Bounding Volume Hierarchies, *ACM Trans. Graphics*, vol. 26, no. 1, p. 6, (2007)
- [8] ANSI/ASHRAE Standard 140-2001, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- [9] G. Lauvray, http://www.lauvray-gilles.eu/solaire_accueil_pv.htm