

**AFPP – 4<sup>e</sup> CONFÉRENCE SUR L'ENTRETIEN  
DES JARDINS, ESPACES VÉGÉTALISÉS ET INFRASTRUCTURES  
TOULOUSE – 19 et 20 OCTOBRE 2016**

**ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DU RAYONNEMENT REÇU PAR LA PELOUSE DE QUATRE  
STADES DE L'EURO 2016**

S. LABOISSE<sup>(1),(2)</sup>, A.-J. ESCOBAR-GUTIERREZ<sup>(1)</sup>, J.-M. HURLUS<sup>(2)</sup> et D. COMBES<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> INRA UR4 – Unité de Recherche Pluridisciplinaire Prairies et Plantes Fourragères, Centre de recherche de Poitou-Charentes, Le chêne – RD150 – CS 80006, 86600 LUSIGNAN, FRANCE, samuel.laboisse@inra.fr, abraham.escobar@lusignan.inra.fr, didier.combes@lusignan.inra.fr

<sup>(2)</sup> TERENVI, Le Zand Put Houck, 59670 WINNEZEELE, FRANCE, jmhurlus@terenvi.com

## **RÉSUMÉ**

La qualité d'une pelouse naturelle dans un stade de football dépend du microclimat régnant dans celui-ci. Elle joue non seulement un rôle important dans la pratique sportive mais aussi vis-à-vis de la perception des spectateurs et du rendu télévisuel. Des pelouses de mauvaise qualité impliquent un changement régulier de ces surfaces pour un surcoût financier important. Or la majorité des stades n'a pas été configuré pour optimiser les conditions microclimatiques pour la pelouse. On se propose ici de se focaliser sur un paramètre microclimatique fondamental pour la croissance des plantes : la lumière. L'objectif est de simuler l'architecture de quatre stades utilisés lors de l'Euro 2016 en France pour calculer l'éclairement reçu au niveau de la pelouse. Cette approche a permis d'identifier des différences d'éclairement selon la position sur la pelouse, et de déterminer l'effet de la latitude et de l'architecture des stades.

Mots-clés : pelouse sportive, environnement lumineux, stade de football, simulation, microclimat.

## **ABSTRACT**

### **SPACE-TIME ANALYSIS OF RADIATION RECEIVED BY PITCH OF FOUR STADIA USED DURING EURO 2016**

Quality of natural grass pitch in a football stadium largely depends on the microclimate prevailing inside. This area not only plays a key role in the match but also in the spectator perception and for the television aesthetics. Bad quality pitches requires a regular change of this turf for a significant financial cost. The majority of stadia has not been built to optimize the microclimate for pitches yet. This study focuses on a fundamental microclimatic parameter for plant growth: light. The goal is to simulate the architecture of four stadia used in Euro 2016 in France to calculate the irradiance received at the pitch level. This approach allowed to identify irradiance differences depending on the position on the pitch, and to determine the effect of latitude and stadia architecture.

Keywords: pitch, light environment, football stadium, simulation, microclimate.

## INTRODUCTION

Les stades sont devenus des édifices multifonctionnels en plus de leur vocation première d'accueillir des matchs de football (Van Hooff et al., 2011). Des milliers de spectateurs ainsi que des équipes professionnelles les utilisent, et ils servent de vitrine au monde entier pour montrer la capacité d'un pays à organiser des événements de grand envergure comme la coupe du monde ou un championnat à l'échelle continentale. La pelouse en particulier est un des éléments majeurs de ces édifices puisque dans le cas des événements sportifs c'est la partie du stade qui concentre l'attention des spectateurs et qui conditionne en partie la qualité du match. Cette surface doit être de grande qualité pour permettre un jeu fluide et spectaculaire (Hughes et al., 2013), de bons appuis pour les joueurs, et une bonne esthétique en termes de retransmissions télévisées.

Pour ces raisons, au cours du championnat d'Europe de football UEFA 2016 (Euro 2016) qui a été organisé en France en 2016, qui est une des compétitions de football les plus importantes du monde (Winter and Pfeiffer, 2016), les pelouses de certains stades accueillant des matchs ont été changées quelques semaines avant le début de la compétition. Les nouvelles pelouses étaient conditionnées en rouleaux et provenaient de gazonnières de plein champs. Les graminées présentes dans les gazons ont vu leur qualité décroître dans les semaines suivant leur installation. Cette diminution de la qualité globale des pelouses sportives semble fortement liée aux changements des conditions microclimatiques entre les gazonnières et l'intérieur des stades. En effet les caractéristiques microclimatiques de l'environnement influencent la qualité d'une pelouse (Beard, 1974). Par ailleurs les stades sont considérés comme des espaces semi-extérieurs (Spagnolo and de Dear, 2003), donc avec des environnements microclimatiques différents par rapport à un espace ouvert.

De manière générale, les plus grands stades de football sont dessinés avant tout pour répondre à des attentes en termes de confort des spectateurs (Van Hoof et al., 2011). Des études microclimatiques ont été conduites pour comprendre l'évolution de la température, de la lumière ou du vent en fonction des éléments d'architecture et leurs effets sur le confort des spectateurs (Bouyer et al., 2005 ; Szücs et al., 2007, 2009 ; Van Hoof et al., 2011). Il a été prouvé par Szücs et al., 2006 que l'ombre portée sur les tribunes des stades dépendait de l'orientation et de la géométrie du stade ainsi que des caractéristiques des matériaux utilisés pour les avancées de toiture, les casquettes. Néanmoins peu d'études évoquent la quantité de lumière reçue par la pelouse dans des stades comme ceux qui ont accueilli des matchs de l'Euro 2016.

Or la lumière est un élément de l'environnement primordial pour assurer la survie des plantes. Elle est la source d'énergie qui permet la réalisation de la photosynthèse. Ce procédé est contrôlé par la densité de flux du rayonnement incident (Woodward and Sheehy, 1983). Elle joue également un rôle dans la température des feuilles, puisque le surplus de photons absorbé et non utilisé par la photosynthèse contribue à l'établissement de la température de l'organe. Des processus vont alors se mettre en place pour réguler cette température, comme par exemple l'évapotranspiration.

Notre étude se propose d'analyser la quantité de rayonnement reçu au niveau des pelouses à l'intérieur des stades. Cette approche est basée sur des simulations qui prennent en compte les effets de l'architecture de chacun des stades évalués ainsi que les variations saisonnières de rayonnement solaire incident. Une telle étude contribue à une meilleure compréhension du microclimat lumineux des stades et d'envisager les raisons des faibles qualités des pelouses pour certains d'entre eux.

## MATERIEL ET MÉTHODE

### Choix des stades

Parmi les 10 stades utilisés pour l'Euro 2016, quatre ont été sélectionnés pour cette étude.

Tableau I : Caractéristiques des stades choisis pour l'étude  
(Stadia characteristics selected for the study)

Nom	Pierre Mauroy	Stade de France	Matmut Atlantique	Vélodrome
Localisation	Villeneuve-d'Ascq (près de Lille)	Saint-Denis (près de Paris)	Bordeaux	Marseille
Coordonnées GPS	50.61° N 3.13° E	48.92° N 2.36° E	44.90° N 0.56° W	43.27° N 5.40° E
Catégorie et sous-catégorie (Bouyer et al., 2005)	2. stade compact semi-ouvert 2. A. Elliptique ou rectangulaire avec des coins arrondis	2 stade compact semi-ouvert 2. A. Elliptique ou rectangulaire avec des coins arrondis	2 stade compact semi-ouvert 2. A. Elliptique ou rectangulaire avec des coins arrondis	3. Stade discontinue 3. A. Symétrique
Type	Construit	Conservé sans modification	Construit	Rénové

Les catégories et sous-catégories proposées sont issues de la classification morphologique établie par Bouyer et al., 2005. Le type fait référence à la voie de modernisation engagée pour les stades en rapport avec l'organisation de l'Euro 2016 en France. Les stades de Bordeaux et de Lille ont été construits pour l'événement, le stade de Marseille a vu sa capacité augmenter de 7000 places et un toit a été construit. Enfin le Stade de France n'a pas connu de modification importante depuis sa construction à l'occasion de la Coupe du Monde de football en 1998.

Les stades choisis présentent quelques-unes des plus grandes capacités en termes de public sur le territoire français. Le stade de France est le plus grand (81338 places), puis vient le stade Vélodrome (67354 places). Le stade Pierre Mauroy est 4<sup>ème</sup> (49834 places) et le stade Matmut Atlantique 6<sup>ème</sup> (42115 places). Tous ces stades sont considérés comme « fermés », c'est-à-dire que la structure latérale accueillant le public ne contient pas d'espace permettant le passage de vent ou de lumière.

La localisation des quatre stades étudiés suit un gradient de latitude du plus septentrional pour le stade de Lille au plus méridional pour le stade de Marseille. Par ailleurs ils sont exposés à quatre climats différents (Joly et al., 2010) :

- Le stade de Marseille se situe sous climat méditerranéen ;
- Le stade de Bordeaux se situe sous climat océanique ;
- Le stade Saint-Denis se situe sous climat océanique dégradé ;
- Le stade de Villeneuve-d'Ascq se situe au niveau de la transition entre climat océanique vrai et climat océanique dégradé.

### Choix des éléments architecturaux

Les éléments architecturaux correspondent à l'ensemble des caractéristiques physiques d'un stade qui détermine sa position dans l'espace comme par exemple la hauteur de ses côtés, son ouverture centrale, la dimension de son toit, son nombre de tribunes. D'après (Szücs et al., 2006), la dimension de plusieurs éléments d'architecture a été comparé, dans les deux sens de la pelouse (longueur et largeur) : la distance entre l'aplomb de la casquette et le bord de la pelouse, la dimension de l'ouverture centrale du toit et la hauteur de la casquette à l'extrémité supérieure. La casquette désigne l'avancée du toit sur la partie centrale du stade.

Table II : Caractéristiques des éléments architecturaux des stades sélectionnés.  
(Characteristics of architectural elements selected for each stadium)

	Longueur			Largueur		
	Distance pelouse / aplomb du toit (m) <sup>(1)</sup>	Dimension ouverture centrale (m) <sup>(3)</sup>	Hauteur toit (m) <sup>(2)</sup>	Distance pelouse / aplomb du toit (m) <sup>(1)</sup>	Dimension ouverture centrale (m) <sup>(3)</sup>	Hauteur toit (m) <sup>(2)</sup>
Lille	+8	121	45	+6	80	45
Saint-Denis	+28	161	46	+17	102	43
Bordeaux	+6	117	31	+6	80	32
Marseille	+13	131	41	+9	86	63

<sup>(1)</sup> L'écart positif signifie que la pelouse n'est pas couverte à l'aplomb du bord de la casquette.

<sup>(2)</sup> Le segment est mesuré au niveau du bord supérieur de la casquette, à l'aplomb du sol.

<sup>(3)</sup> La dimension donnée passe par le centre du terrain.

### Détermination du rayonnement incident au niveau de la pelouse

Le modèle SPCTRAL2 (Bird and Riordan, 1986) a été utilisé pour calculer les composantes directes et diffuses de l'éclairement à la surface de la Terre pour des conditions de ciel sans nuage. L'éclairement incident théorique que nous avons calculé est la somme de l'éclairement direct et de l'éclairement diffus reçu par unité de surface à un instant donné.

Le rayonnement théorique correspond au rayonnement incident juste au-dessus des stades, en ne tenant pas compte des modifications dues aux effets de l'atmosphère et à ses changements physiques journaliers (nébulosité). Il a été utilisé pour calculer les valeurs de rayonnement à l'intérieur des stades en prenant en compte le taux de transmission de leurs éléments architecturaux qui ont tous été considérés comme opaques.

Le logiciel de simulation VegeSTAR (Adam et al., 2006), qui a été développé pour calculer le rayonnement intercepté par un couvert végétal à partir de sa représentation 3D, a été utilisé pour déterminer le pourcentage de rayonnement solaire transmis entre les éléments architecturaux des stades à partir du rayonnement solaire théorique.

### Sorties du modèle et traitement des données

Les dimensions officielles pour un terrain utilisé dans la pratique du football en compétition, recommandée par l'UEFA et la FIFA sont 105 x 68 m (Ragain et al., 2011). Chaque terrain est divisé en unité de surface carré de 1m de côté. Pour chacun de ces carrés, l'éclairement heure par heure pour chaque jour de l'année est simulé. Il s'agit du produit du rayonnement incident théorique et du pourcentage de rayonnement transmis entre les structures du stade. Ces deux éléments prennent en compte les rayonnements directs et diffus. L'éclairement journalier pour chaque unité de surface est calculé en faisant la somme des éclairagements de toutes les heures du jour considéré. La moyenne de l'éclairement pour les extrémités Nord et Sud de la pelouse est également calculée. Les extrémités Nord et Sud correspondent à des bandes de 1m de largeur sur toute la largeur de la pelouse. Ces bandes sont situées dans les parties les plus au Nord et les plus au Sud de l'aire de jeu. La moyenne se fait sur toutes les valeurs d'éclairement journalier des unités de surface présentes dans les bandes.

## RÉSULTATS

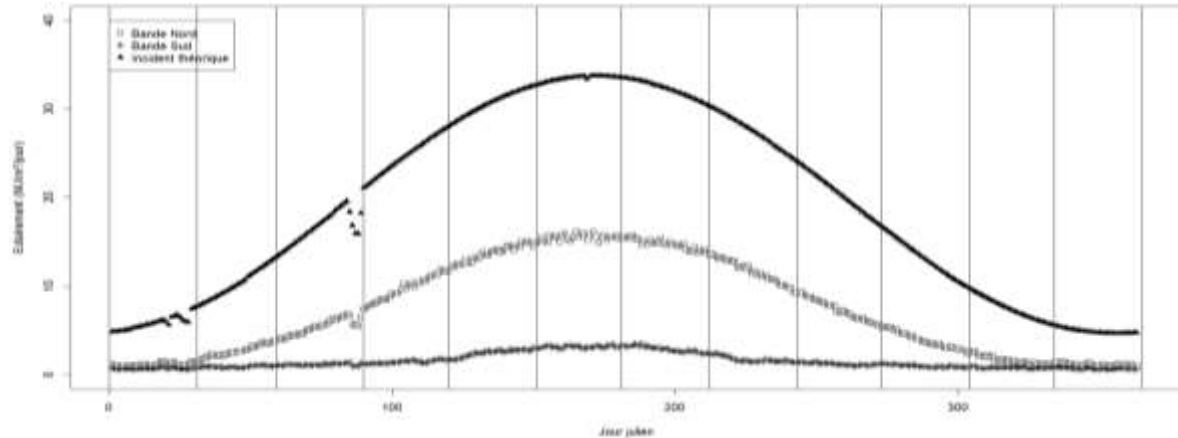
Les résultats présentés correspondent à l'évolution en fonction de l'année de la valeur d'éclairement cumulé par jour. Dans une première partie, trois types d'éclairement sont exposés pour chacun des quatre stades : l'éclairement journalier incident théorique, l'éclairement pour la bande Nord et celui pour la bande Sud. Dans une seconde partie pour un même type d'éclairement, l'évolution de l'éclairement est comparée pour les quatre stades.

Pour l'ensemble des figures, les traits verticaux représentent les mois de janvier à décembre.

### Evolution temporelle de l'éclairement reçu par la pelouse

Figure 1 : Evolution de l'éclairement journalier pour la bande Nord et la bande Sud sur la pelouse ainsi que de l'éclairement incident journalier théorique pour le stade de Lille.

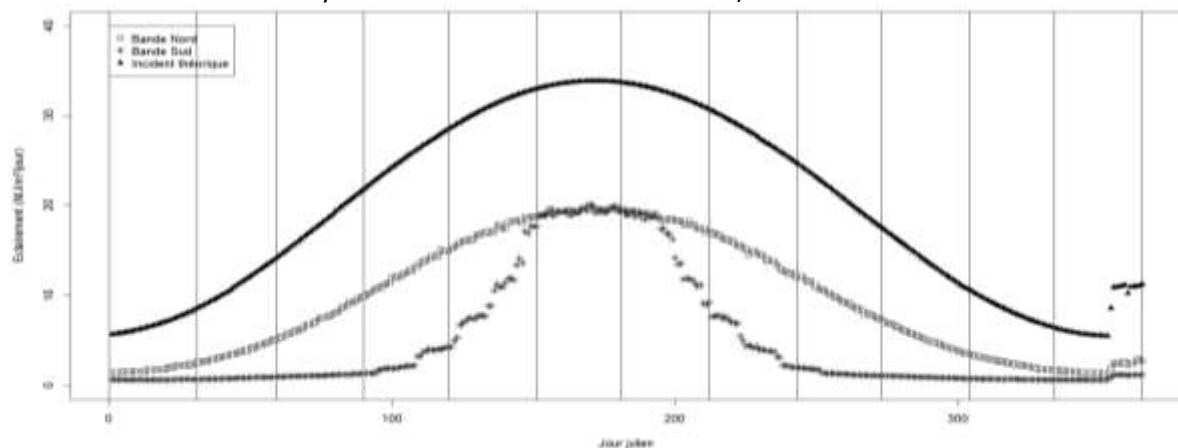
(Evolution of the incident daily irradiance for the North and the South positions on the pitch and for the theoretical daily irradiance for Lille stadium)



Sur la pelouse du stade de Lille, l'éclairement de la bande Nord est un peu moins de 5 fois supérieur à celui de la bande Sud au printemps et en été, jusqu'à un peu moins de 6 fois supérieure en automne et n'est plus 1,6 fois supérieure en hiver. Le maximum d'éclairement journalier atteint en juin est de  $16.23 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$  sur la bande Nord et de  $3.53 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$  pour la bande Sud.

Figure 2 : Evolution de l'éclairement journalier pour la bande Nord et la bande Sud sur la pelouse ainsi que l'éclairement journalier incident théorique pour le stade de Saint-Denis.

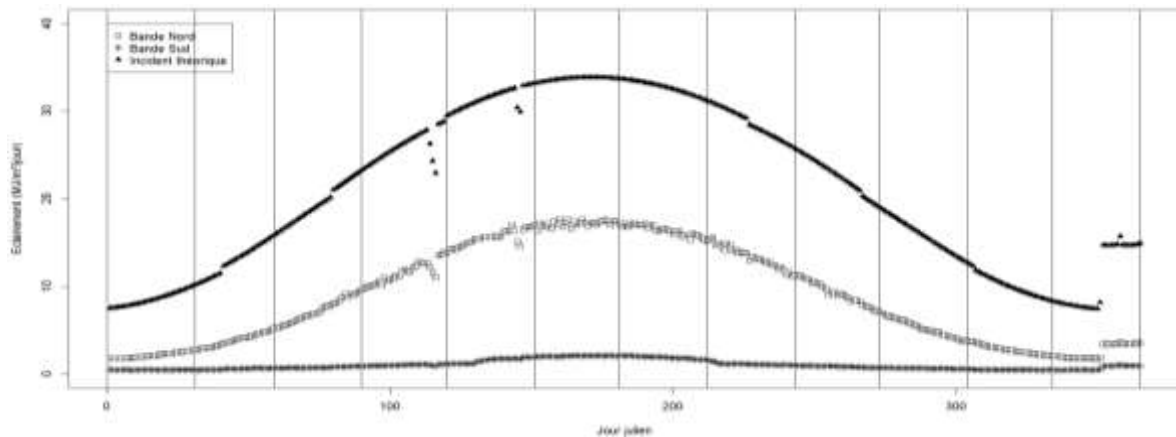
(Evolution of the incident daily irradiance for the North and the South positions on the pitch and for the theoretical daily irradiance for Saint-Denis stadium)



A Saint-Denis, l'éclairement moyen journalier de la bande Nord est légèrement au-dessus de celui de la bande Sud en janvier et décembre (environ 2 fois plus élevé), au même niveau en juin et début juillet et très largement au-dessus le reste de l'année (environ 7 fois plus élevé). Nous avons une augmentation très nette de l'éclairement de la bande Sud à partir de la mi-avril, il atteint son maximum en juin, diminue de mi-juillet à fin août pour atteindre des niveaux faibles au-delà. Pour les deux bandes l'éclairement maximum est égal à  $20 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ .

Figure 3 : Evolution de l'éclairement journalier pour la bande Nord et la bande Sud sur la pelouse ainsi que l'éclairement incident théorique journalier pour le stade de Bordeaux.

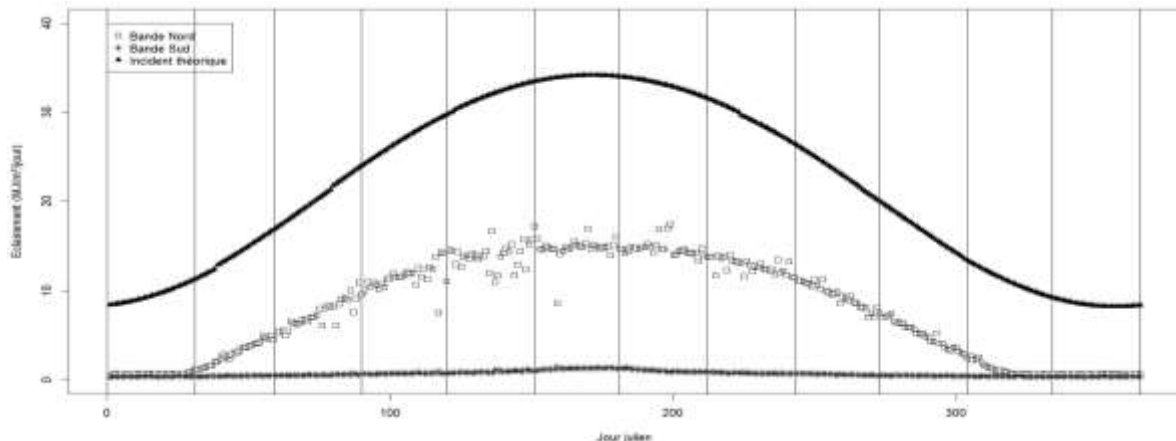
(Evolution of the incident daily irradiance for the North and the South positions on the pitch and for the theoretical daily irradiance for Bordeaux stadium)



Sur le stade de Bordeaux, les valeurs d'éclairement journalier de la bande Nord sont toujours supérieures à celles de la bande Sud. Elles sont 10 fois supérieures au printemps et en automne, 8 fois en été et un peu moins de 4 fois en hiver. Le maximum d'éclairement atteint en juin pour les deux bandes est de  $17.7 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$  pour la bande Nord et de  $2.15 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$  pour la bande Sud.

Figure 4 : Evolution de l'éclairement journalier pour la bande Nord et la bande Sud sur la pelouse ainsi que l'éclairement incident journalier théorique pour le stade de Marseille.

(Evolution of the incident daily irradiance for the North and the South positions on the pitch and for the theoretical daily irradiance for Marseille stadium)



A Marseille, les valeurs d'éclairement pour la bande Nord sont très largement supérieures (15 fois supérieure au printemps, 12 fois en été et 14 fois en automne) à celles de la bande Sud, sauf en janvier et de mi-novembre à fin décembre où elles sont globalement les mêmes (1.7 fois supérieure au 21 décembre par exemple). Le maximum d'éclairement atteint en juin est de  $17.5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$  pour la bande Nord et de  $1.5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$  pour la bande Sud.

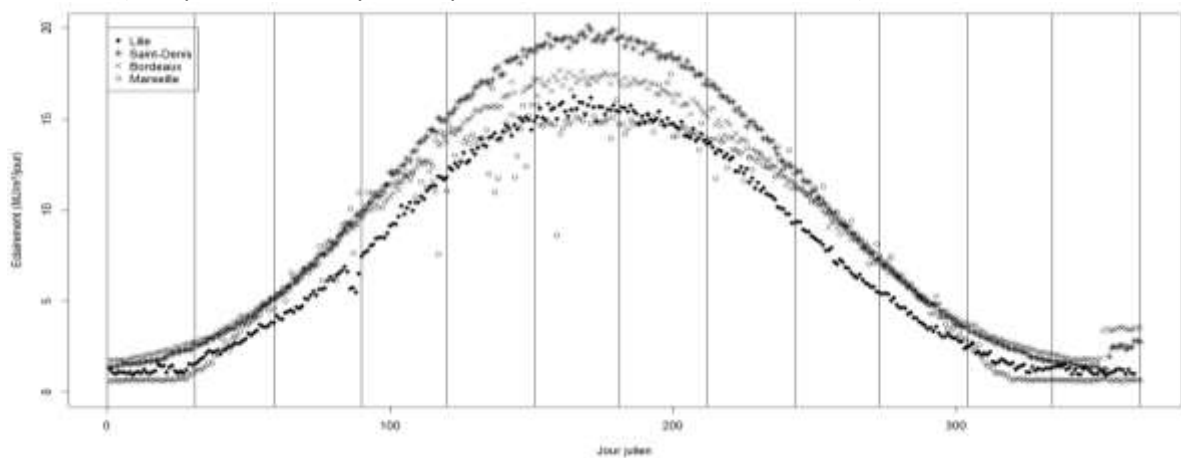
Au niveau de la bande Nord de chacun des stades étudiés, les pertes d'éclairement par rapport à la valeur théorique sont situées entre 50 et plus de 90%. Concernant la bande Sud les pertes sont de 85 à plus 97% de l'éclairement théorique. Seul l'éclairement pour les deux bandes à Saint-Denis en été est légèrement inférieur à 40%. C'est à Marseille que l'on constate le plus de perte par rapport au rayonnement théorique, principalement en été et en hiver pour la bande Nord, et sur l'ensemble de l'année pour la bande Sud. Lille présente le plus d'atténuation du rayonnement au printemps et en été. En revanche la bande Sud présente le moins de perte principalement au printemps, en automne et en hiver.

#### Comparaison par type de rayonnement entre stades.

Il s'agit ici de comparer pour un même type d'éclairement (Nord, Sud, incident théorique) les valeurs entre les stades.

Figure 5 : Comparaison pour les quatre stades de cumuls journaliers d'éclairement de la bande Nord en fonction du temps.

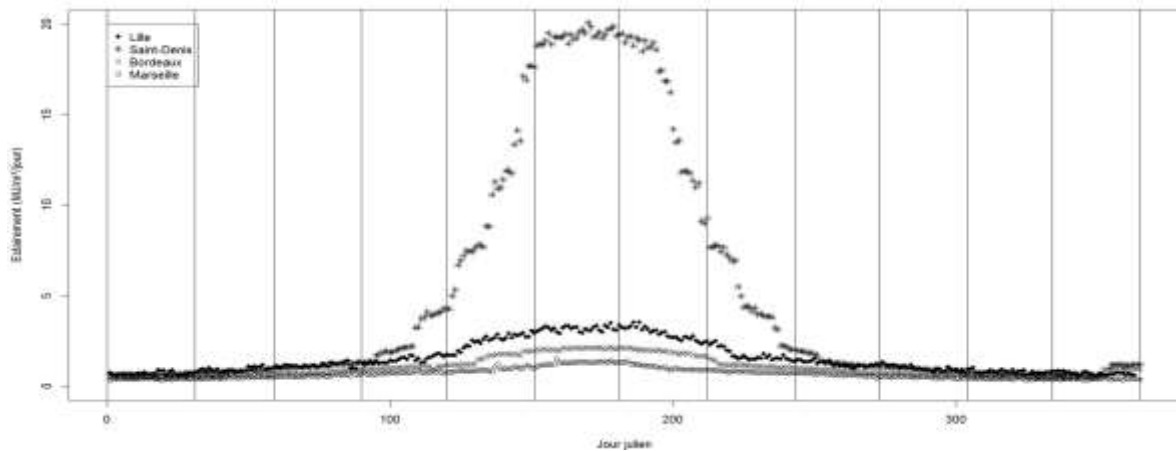
(Comparison of daily North position's irradiance for four stadia)



Au-niveau de la bande Nord, au mois de janvier, c'est à Bordeaux que les valeurs d'éclairement journalier moyen sont les plus élevées, suivent Saint-Denis, Lille et enfin Marseille. Au cours du mois de février, l'éclairement à Marseille augmente pour atteindre des valeurs similaires à Saint-Denis et Bordeaux jusqu'à début mai où il reprend des valeurs minimales par rapport aux autres stades. De février à mars les valeurs à Saint-Denis et Bordeaux sont similaires. L'éclairement à Marseille est supérieur aux valeurs d'éclairement de Lille en août, présente des valeurs similaires à Saint-Denis et Lille jusqu'en octobre, et passe sous celles de Lille en novembre et décembre. A partir de mars, Saint-Denis a les valeurs les plus élevées jusqu'en début septembre où elles restent similaires jusqu'à fin octobre pour ensuite être inférieures à celles de Bordeaux en hiver.

Figure 6 : Comparaison pour les quatre stades de cumuls journaliers d'éclairement de la bande Sud en fonction du temps

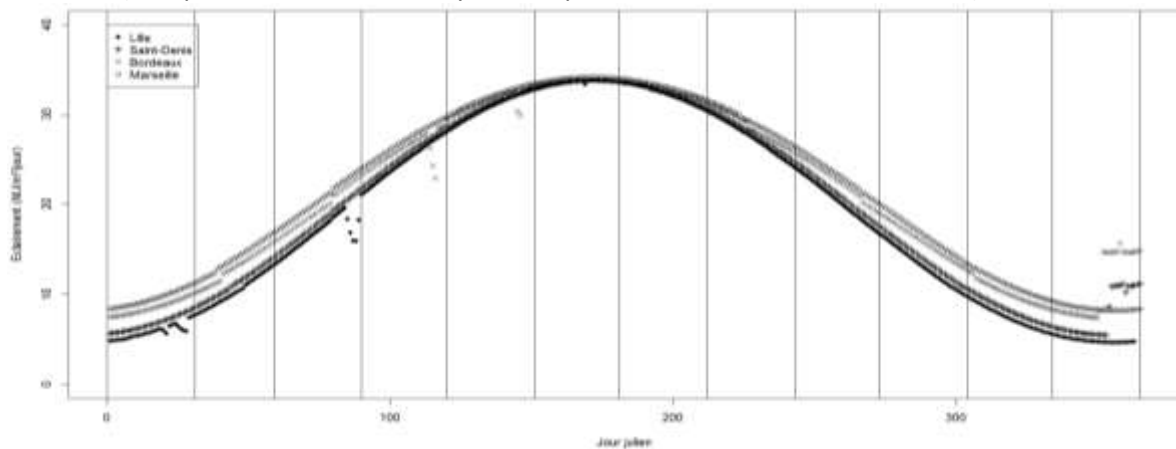
(Comparison of daily South position's irradiance for four stadia)



Concernant la bande Sud, de janvier à mars et de octobre à décembre, les valeurs d'éclairement sont similaires, avec des valeurs à Lille et Saint-Denis légèrement supérieures aux deux autres. Entre avril et août les différences deviennent très significatives : les valeurs de Saint-Denis sont très largement supérieures à celles de Lille, Bordeaux et enfin Marseille dans l'ordre décroissant. Les valeurs maximales se situent pour tous les stades durant le mois de juin.

Figure 7 : Comparaison pour les quatre stades de cumuls journaliers d'éclairement incident théorique en fonction du temps

(Comparison of incident daily theoretic position's irradiance for four stadia)



Tout au long de l'année les valeurs du rayonnement théorique restent dans l'ordre croissant comme suit : Lille, Saint-Denis, Bordeaux et Marseille. En hiver les différences sont beaucoup plus significatives qu'en été. Elles sont similaires au printemps et en automne.

## **DISCUSSION**

Pour tous les stades considérés, il existe une dépendance entre la latitude et l'éclairement incident théorique. Or Milankovitch, 1930 nous indique que l'angle zénithal du Soleil est fonction de la latitude. Cet angle est impliqué dans le calcul de l'éclairement direct et dans les composantes de l'éclairement diffus d'une surface horizontale (Bird and Riordan, 1986). Par ailleurs les différences de valeur dans l'éclairement incident théorique en fonction de la position géographique sont plus marquées en hiver qu'en été. En hiver les radiations solaires traversent une épaisseur plus importante d'atmosphère de par l'inclinaison de la Terre. Cette épaisseur étant également dépendante de la latitude, une plus grande épaisseur d'atmosphère sera traversée par une radiation solaire à une latitude plus élevée. Ainsi les différences entre latitude pour une même saison sont plus marquées en hiver qu'en été.

En hiver le stade de Marseille présente un éclairement incident théorique journalier plus important que celui de Bordeaux. Ce résultat est cohérent avec le fait que les plus faibles latitudes présentent un rayonnement incident théorique journalier plus élevé. Or les éclairagements cumulés journaliers de la bande Nord sont plus importants à Bordeaux qu'à Marseille. Le stade Vélodrome présente une hauteur de casquette dans la longueur supérieure de 12m par rapport à celle de Bordeaux. Cette caractéristique semble être le paramètre déterminant pour expliquer les différences d'éclairement en hiver.

Au printemps la quantité de rayonnement reçue augmente et le soleil est plus haut dans le ciel, ce qui atténue les effets des casquettes plus hautes et favorisent les stades ayant les ouvertures centrales les plus grandes. Ainsi à Marseille, les valeurs d'éclairement théoriques cumulées sont les plus fortes, dès que le rayonnement est direct sur des zones de pelouse, ces valeurs augmentent. C'est pour cette raison que les valeurs d'éclairement cumulé augmentent plus que dans les autres stades au printemps. Par ailleurs une ouverture centrale plus grande permet un cumul de rayonnement direct plus grand. C'est le cas à Saint-Denis. Un rayonnement incident théorique faible, associé à des casquettes hautes et une ouverture centrale faible ne favorise pas l'augmentation du cumul d'éclairement à Lille.

On peut voir le plus l'effet de l'architecture sur le cumul d'éclairement en été. Alors que les différences d'éclairement incident théorique sont faibles entre les stades, les différences dans les éclairagements reçus par les pelouses sont les plus importantes. Les plus grosses pertes par rapport au rayonnement incident en été ont lieu à Marseille. Même si ce stade présente une grande ouverture centrale, son hauteur de toit est importante, en particulier dans le sens est-ouest. Or c'est le sens de la course du soleil, il doit avoir atteint une position au-dessus de l'horizon suffisamment haute pour que le rayonnement direct atteigne la pelouse, plus haute que dans les autres stades. De plus cet effet n'est pas compensé par l'écart de l'aplomb de la casquette avec la pelouse. L'ouverture centrale est quant à elle fortement impliquée dans la quantité de rayonnement reçue dans un stade. En effet les effets d'une hauteur de toit importante peuvent être compensés par une ouverture centrale conséquente. Le Stade France présente les hauteurs de toit les plus importante dans le sens de la longueur mais il présente les niveaux d'éclairement les plus élevés pour les bandes Nord et Sud.

Deux types d'écart de rayonnement ont été constatés entre les bandes Nord et Sud : un écart en termes de quantité de rayonnement pour une même date et un écart dans le cumul au fil des saisons. Les écarts en termes d'intensité de rayonnement ont des effets sur la photosynthèse (Wilkinson et al., 1975) avec des conséquences sur la croissance des plantes. Par ailleurs lors de la reprise de croissance au printemps, des niveaux de rayonnement doivent être suffisants pour engendrer de nouveaux tissus (Porcar-Castell et al., 2008) or pour les positions au Sud, les niveaux de rayonnement restent faibles tout au long de l'année. Ces conditions pourraient ne pas favoriser cette reprise de croissance.

## **CONCLUSION**

Dans cette étude, nous avons adopté une approche de simulation pour étudier le rayonnement reçu par la pelouse de quatre stades utilisés lors de l'Euro 2016 en France. Cette étude a permis d'expliquer les différences en termes d'éclairement cumulés journaliers au-niveau de la pelouse par rapport à des éléments d'architecture. La latitude des stades joue un rôle important dans la valeur de l'éclairement

incident théorique mais n'explique pas les différences constatées au fil de l'année et de la position sur la pelouse. Selon les saisons, il semble que différents éléments d'architecture interviennent dans l'établissement de la valeur de l'éclairement journalier. En hiver, c'est la hauteur du toit qui joue le rôle le plus déterminant. Par la suite c'est l'ouverture centrale qui devient le paramètre déterminant, associée à un fort écart pelouse-aplomb du toit. Une hauteur importante du toit induit une diminution de l'éclairement journalier mais son effet peut être compensé par une grande ouverture centrale. Cette approche de simulation nous a aussi permis de mieux cerner les variations d'éclairement par rapport à la position sur la pelouse mais également au fil de l'année. Ces variations spatio-temporelles nous permettent d'envisager des pistes de réflexion pour expliquer les difficultés de croissance des graminées dans ces pelouses. Dans la perspective d'étendre la gamme d'éléments architecturaux à analyser mais aussi d'identifier des interactions entre ces paramètres, une analyse de sensibilité sera effectuée en tenant compte des variations des valeurs de ces paramètres dans différents contextes géographiques. Ainsi il nous sera possible d'évaluer la meilleure configuration architecturale pour optimiser les valeurs d'éclairement au-niveau de la pelouse pour une région donnée.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient M. D'ARGENLIEU responsable du stade de Marseille, M. PRESSARD pour le stade de Bordeaux, l'entreprise TERENVI pour le stade Pierre Mauroy de Lille et les responsables du stade de France pour l'accès aux données concernant l'architecture des stades.

## BIBLIOGRAPHIE

- Adam B., Dones N., Sinoquet H., 2006. VegeSTAR : software qui calcule l'interception lumineuse et la photosynthèse. INRA, Clermont-Ferrand.
- Beard J.B., 1974. Turfgrass : science and culture. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- Bird R.E., Riordan C., 1986. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmosphere. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 25.
- Bouyer J., Vinet J., Delpech P., Carré S., 2005. Thermal comfort assessment in semi-outdoor environments: Application to comfort study in stadia. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 95, 963–976.
- Hughes M.G., Birdsey L., Meyers R., Newcombe D., Oliver J.L., Smith P.M., Stembridge M., Stone K., Kerwin D.G., 2013. Effects of playing surface on physiological responses and performance variables in a controlled football simulation. *J. SPORTS Sci.* 31, 878–886.
- Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhes J., Hilal M. et Wavresky P., « Les types de climats en France, une construction spatiale », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Cartographie, Imagerie, SIG, document 501, mis en ligne le 18 juin 2010, consulté le 30 juin 2016. URL : <http://cybergeo.revues.org/23155>
- Porcar-Castell A., Juurola E., Ensminger I., Berninger F., Hari P., Nikinmaa E., 2008. Seasonal acclimation of photosystem II in *Pinus sylvestris*. II. Using the rate constants of sustained thermal energy dissipation and photochemistry to study the effect of the light environment. *Tree Physiol.* 28, 1483–1491.
- Ragain E., Hayden R., Lavelle D., 2011. Stades de football - Recommandations et exigences techniques (5ème édition). FIFA.
- Spagnolo J., de Dear R., 2003. A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Build. Environ.* 38, 721–738.
- Szucs A., Perraudeau M., Allard F., 2006. Assessment of visual comfort of spectators in stadia. Presented at the PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Architectural Press, Genève.
- Szucs A., Moreau S., Allard F., 2007. Spectators' aerothermal comfort assessment method in stadia. *Build. Environ.* 42, 2227–2240.
- Szucs A., Moreau S., Allard F., 2009. Aspects of stadium design for warm climates. *Build. Environ.* 44, 1206–1214.

- Van Hooff T., Blocken B., Van Harten M., 2011. 3D CFD simulations of wind flow and wind-driven rain shelter in sports stadia: Influence of stadium geometry. *Build. Environ.* 46, 22–37.
- Wilkinson J.F., Beard J.B., Krans J.V., 1975. Photosynthetic-respiratory responses of “Merion” Kentucky bluegrass and “Pennlawn” red fescue at reduced light intensities. *Crop Sci.* 15, 165–168.
- Winter C., Pfeiffer M., 2016. Tactical metrics that discriminate winning, drawing and losing teams in UEFA Euro 2012®. *J. Sports Sci.* 34, 486–492.
- Woodward F.I., Sheehy J.E., 1983. *Principles and measurements in environmental biology*, Butterworth & Co. ed.