



HAL
open science

Caractérisations des ambiances des stades modernes du point de vue du confort aérothermique des spectateurs contribution à l'approche multicritères du confort aérothermique, visuel et acoustique

Agota Szucs

► **To cite this version:**

Agota Szucs. Caractérisations des ambiances des stades modernes du point de vue du confort aérothermique des spectateurs contribution à l'approche multicritères du confort aérothermique, visuel et acoustique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de La Rochelle, 2005. Français. NNT : . tel-00348620

HAL Id: tel-00348620

<https://theses.hal.science/tel-00348620v1>

Submitted on 19 Dec 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

ECOLE DOCTORALE ED 0374

Année 2005

THÈSE DE DOCTORAT

Discipline : Génie Civil

présentée et soutenue publiquement par

ÁGOTA SZÜCS

le 19 décembre 2005

au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Nantes

**CARACTERISATION DES AMBIANCES DES STADES MODERNES
DU POINT DE VUE DU CONFORT AEROTHERMIQUE
DES SPECTATEURS**

**CONTRIBUTION A L'APPROCHE MULTICRITERES AEROTHERMIQUE, VISUELLE ET
ACOUSTIQUE**

Jury :

F. ALLARD	<i>Professeur, Université de La Rochelle (Directeur de thèse)</i>
J. GANDEMER	<i>Ingénieur, Chef du Département Climatologie, Aérodynamique, Pollution et Epuration de CSTB de Nantes</i>
J. A. GIL SARAIVA	<i>Professeur, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Rapporteur)</i>
P. Y. NIZOU	<i>Professeur, Université de Nantes (Rapporteur)</i>
S. MOREAU	<i>Ingénieur de recherche, CSTB de Nantes (Encadrante)</i>
A. ZÖLD	<i>Professeur, Université de Technologie et de l'Economie de Budapest</i>

Laboratoire : **Laboratoire d'Etudes des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment (LEPTAB)**

Adresse : **Avenue Michel Crépeau 17042 La Rochelle Cedex 1, France**

Laboratoire d'accueil : **Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
Département Climatologie, Aérodynamique, Pollution et Epuration**

Adresse : **11 rue Henri Picherit, BP 82341, 44323 Nantes Cedex 3, France**

CARACTERISATION DES AMBIANCES DES STADES MODERNES DU
POINT DE VUE DU CONFORT AÉROTHERMIQUE DES
SPECTATEURS

*contribution à l'approche multicritères du confort aérothermique, visuel et
acoustique*

ÁGOTA SZÚCS

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur Jaques Gandemer, chef de Département Climatologie, Aérodynamique, Pollution et Epuration du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Nantes pour m'avoir accueillie dans son équipe.

Mes remerciements s'adressent particulièrement au Professeur Francis Allard, directeur du Laboratoire d'Etudes des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment (LEPTAB) de l'Université de La Rochelle pour avoir dirigé cette thèse. Ses conseils précieux et ses encouragements bienveillants m'ont beaucoup aidé dans la réalisation de ce travail.

Je remercie également à Madame Sophie Moreau, ingénieur de recherche au CSTB de Nantes, pour la confiance qu'elle m'a accordée depuis mon arrivée au CSTB et pour son encadrement précis pendant ces trois années.

Je tiens à remercier Professeur Alberto Jorge Gil Saraiva du Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisbonne et Monsieur Pierre-Yves Nizou, professeur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, pour l'attention particulière qu'ils ont portée à ce manuscrit en tant que rapporteurs.

Je souhaite remercier Monsieur András Zöld, professeur à l'Université de Technologie et de l'Economie de Budapest pour avoir accepté de faire partie du jury.

Je suis reconnaissante à Messieurs Michel Perraudon et Michel Garcia, ingénieurs d'études et de recherche à la Division Eclairage et Colorimétrie du CSTB de Nantes pour leur aide précieuse dans la simulation numérique de l'ensoleillement de l'aire de jeu. Je remercie également Monsieur Jacques Martin, adjoint au chef du Département Acoustique et Eclairage du CSTB de Grenoble pour ces conseils concernant l'ambiance acoustique dans les stades, ainsi que Messieurs Pierre Jean et Christian Sacré pour leur aide dans l'analyse statistique des données.

Je tiens à exprimer ma sympathie et remerciement aux agents du CSTB de Nantes qui ont contribué à ce travail en créant une ambiance chaleureuse, en particulier à Laurence, Sylvaine, Edith, Philippe, Marc, Jérôme, Julien, Samuel, Jean-Paul, Pierre, Nicolas etc.

Je remercie également Joyceline, Jacky, Bruno, Stéphane, Joël, Bernard, Patrick, Guillaume, Cyril, Yvan, Emmanuel, William pour leur aide dans la réalisation de la maquette et pour leur soutien technique.

Je ne manque pas de remercier Gaëlle et Maëva pour leur relecture du manuscrit.

Merci enfin pour Estel et Carlotta pour leur amitié.

AVANT - PROPOS

Cette étude a fait l'objet de publications et de communications suivantes :

- SZUCS A. (2004)
Reflection about thermal comfort of spectators in stadia
Bulletin of the Faculty of Architectural Engineering, Budapest University of Technology and Economics, Hungary, ISSN 1785-9565;
- SZUCS A. (2004)
Stadia in the environment – environment in stadia
Proceedings of the 21st International Conference of Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Eindhoven, The Netherlands, 2004 ISBN 90-386-1636-8;
- SZUCS A., MOREAU S. (2005)
A szél, az épület es az ember. (en hongrois; traduction du titre : Le vent, le bâtiment et l'architecture), Építészspektrum (journal hongrois d'architecture et de science) Février 2005 ISSN 1587 8724;
- SZUCS A., ALLARD F., MOREAU S. (2005)
Effect of roof on thermal and visual comfort of spectators in stadia
IV Congreso Latinoamericano Sobre Confort y Comportamiento Termico de las Edificaciones Mexico City, Mexico, May 2005;
- SZUCS A., MOREAU S., ALLARD F.(2005)
Influence of Canopy on Airflow in Stadia
The Fourth European & African Conference on Wind Engineering, Prague, Czech Republic, 2005 ISBN 80-86246-26-4.
- SZUCS A., ALLARD F., MOREAU S. (2005)
Effect of Façade Porosity on Air Flow in Stadia,
7th Nordic Building Physics Symposium, Reykjavík Iceland 2005
ISBN 9979 9174 5 8
- *Proposé pour publication dans le journal international Building and Environment :*
SZUCS A., ALLARD F., MOREAU S. (2005)
Spectators' aerothermal comfort assessment method in stadia

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
---------------------------	---

CHAPITRE I.

ETAT DE L'ART :

APERÇU HISTORIQUE ET MORPHOLOGIQUE DES STADES, DU CONFORT AU VENT, DU CONFORT THERMIQUE, VISUEL ET ACOUSTIQUE

1. HISTOIRE ET MORPHOLOGIE DES STADES DE L'ANTIQUITE A NOS JOURS	5
1.1 LA GENESE DU STADE – LE STADE GREC	5
1.2 L'AMPHITHEATRE ROMAIN	9
1.3 BATIMENTS INFLUENCANT L'ÉVOLUTION DU STADE	14
1.4 LES STADES CONTEMPORAINS	17
1.4.1 Orientation du stade	17
1.4.2 Conception des tribunes	18
1.4.3 Structure et matériaux des tribunes	21
1.4.4 Conception des toitures	22
2. LA NOTION DE CONFORT DANS LES STADES	26
2.1 CONFORT AU VENT	27
2.1.1 Approche générale du confort au vent	27
2.1.2 Confort au vent dans les stades	32
2.2 CONFORT THERMIQUE	38
2.2.1 Approche générale du confort thermique	38
2.2.1.1 Facteurs influençant le confort thermique	38
2.2.1.2 L'effet de la turbulence sur le confort thermique	41
2.2.1.3 Le bilan thermique du corps humain	42
2.2.1.4 Les indices et chartes de confort thermique	46
2.2.1.5 Les indices et cartes de confort thermique applicables en espace extérieur	52
2.2.2 Le confort thermique dans les stades	57
2.3 L'APPROCHE GENERALE DU CONFORT VISUEL	62
2.3.1 La source de lumière du jour	62
2.3.2 Confort visuel dans les stades	64
2.4 APPROCHE DU CONFORT ACOUSTIQUE DANS LES STADES	70
3. CONCLUSION – HYPOTHESES DU TRAVAIL	74

C H A P I T R E I I .

OUTILS EXPERIMENTAUX, CHOIX DES CONFIGURATIONS POUR LES ESSAIS PARAMETRIQUES EN SOUFFLERIE, METHODE D'ANALYSE DES RESULTATS

1. CONCEPTION DE LA ZONE DE CONFORT THERMIQUE COMPOSEE DE LIMITES DU CARACTERE THERMIQUE ET MECANIQUE	77
1.1 LIMITE DE MOUVEMENT D'AIR ASSOCIEE AUX BASSES TEMPERATURES EXTERIEURES	79
1.2 LIMITE DE MOUVEMENT DE L'AIR ASSOCIEE AUX HAUTES TEMPERATURES EXTERIEURES.....	81
1.3 EFFET DU RAYONNEMENT ET DE L'HUMIDITE SUR LE CONFORT THERMIQUE	84
1.4 INTERPRETATION DU CONFORT ET DE L'INCONFORT	85
2. CHOIX DES CONFIGURATIONS DE STADE POUR LES ESSAIS PARAMETRIQUES EN SOUFFLERIE.....	88
2.1 TYPOLOGIE DES STADES MODERNES.....	88
2.2 CONCEPTION DE LA MAQUETTE A GEOMETRIE VARIABLE.....	101
2.3 TABLEAU DES CONFIGURATIONS A ETUDIER.....	102
3. CARACTÉRISATION STATISTIQUE DE L'ÉCOULEMENT	108
3.1 PARAMÈTRE DESCRIPTIF DE LA GÊNE DUE AU VENT	108
3.2 MÉTHODE D'ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES	110
4. CARACTÉRISATION DE LA SOUFFLERIE À COUCHE LIMITE.....	117
4.1 SIMULATION DU VENT A ÉCHELLE REDUITE EN SOUFFLERIE.....	117
4.2 TECHNIQUE DE MESURE DE VITESSE PAR ANÉMOMÉTRIE A FIL CHAUD.....	119
5. CONCEPTION D'ANALYSE D'ENSOLEILLEMENT PAR L'HORIZONTOSCOPE.....	122

C H A P I T R E I I I .

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

1. RESULTATS DES ESSAIS PARAMETRIQUES MENES EN SOUFFLERIE	125
2. INFLUENCE DES DIFFÉRENTS PARAMETRES MORPHOLOGIQUES SUR L'ÉCOULEMENT DE L'AIR	206
2.1 EFFET DE LA POROSITÉ DE FAÇADE.....	207
2.1.1 Premier groupe de porosité : brèches horizontales périphériques	207
2.1.2 Deuxième groupe de porosité : Brèches verticales périphériques et concentrées.....	216
2.1.3 Troisième groupe de porosité des configurations : Brèches horizontales concentrées.....	221
2.1.4 Quatrième groupe de porosité des configurations : Ensemble des brèches horizontales et verticales uniformément réparties et brèches horizontales concentrées....	225
2.2 EFFET DE L'INCLINAISON DE LA TOITURE	231
2.3 EFFET DES DEBORDS DE TOITURE	236
3. ANALYSE DU CONFORT VISUEL EN LUMIÈRE DU JOUR.....	241
3.1 ENSOLEILLEMENT DE L'AIRE DE JEU	241
3.2. MÉTHODE DE DÉTERMINATION DE LA MORPHOLOGIE PHOTOMÉTRIQUE DE LA TOITURE.....	267
4. METHODOLOGIE DE TRANSPOSITION DES RESULTATS DES ESSAIS MENEES EN SOUFFLERIE AUX CAS REELS	274
4.1 DONNEES CLIMATIQUES DU SITE D'IMPLANTATION ET DONNEES CARACTERISTIQUES DU STADE	274
4.2 CHOIX PRÉLIMINAIRE DES CONFIGURATIONS DU STADE.....	275
4.3 RECALAGE CLIMATIQUE DES DONNEES METEOROLOGIQUES	278
4.4 ÉVALUATION DU CONFORT AEROTHERMIQUE SUR LA BASE DE LA TEMPERATURE ET DU MOUVEMENT DE L'AIR	279
4.5 ETUDE DES CAS	285
5. REFLEXIONS SUR LA MÉTHODE DE CONFRONTATION DES CRITÈRES	298
6. LE STADE IDÉAL EXISTE-T-IL?	303
CONCLUSION.....	309
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	316

INTRODUCTION

Cette étude s'articule autour d'une méthodologie d'évaluation du confort aérothermique des spectateurs en espaces semi-extérieurs, en particulier dans les stades modernes. Elle propose une extension de l'approche aérothermique au confort visuel et aborde les aspects de confort acoustique.

Les stades représentent une transition entre les espaces extérieurs et intérieurs. Ils sont classés dans les espaces 'semi-extérieurs' car ils sont ouverts. Cependant ils présentent des structures qui modifient notamment l'effet des paramètres climatiques (ex. : la toiture qui protège contre le soleil, le vent et les précipitations ou un mur qui fonctionne comme un écran brise vent et protège contre le vent) [Spagnolo *et al.*, 2003]. Ces structures dans certaines conditions peuvent atténuer ou renforcer l'effet des paramètres climatiques mais rarement les éliminer.

Les caractéristiques climatiques ne sont pas toujours prises en compte dans la conception des stades. Or ces caractéristiques climatiques sont des facteurs déterminants de la qualité d'ambiance de ces espaces. Il est donc nécessaire de les intégrer dès la phase de conception afin d'assurer le confort aérothermique des spectateurs. Une prise en compte en amont de ces paramètres permet en outre d'éviter d'éventuelles corrections ultérieures qui s'avèrent généralement délicates et coûteuses.

De nombreuses études menées en espaces semi extérieurs et extérieurs portent sur le confort thermique en espace urbain. Peu de travaux portent sur le confort thermique dans les espaces semi extérieurs [Arens *et al.*, 1986 ; Fiala *et al.*, 1999] et encore moins sur le confort thermique des spectateurs dans les stades. Les travaux menés sur le confort thermique dans ces espaces soulignent qu'**en espace extérieur et semi extérieur en raison de la forte variation des facteurs climatiques, on ne peut pas attendre que les conditions soient confortables 100% du temps** [Alvarez *et al.*, 1991 ; Nikopoulou *et al.*, 2001].

Certaines études menées sur des stades réels et qui concernent uniquement **le confort au vent** mettent en évidence notamment des anomalies aérodynamiques (accélérations, moindre de ventilation) qui apparaissent au niveau de tribunes ou de l'aire de jeu dans les stades en construction ou achevés [Dufresne de Virel, 1995(1), 1995(2), 1995(3) ; Gandemer, 1994 ; Moreau, 2001 , Moreau 2002(1), 2002 (2)]. Diverses solutions sont ensuite proposées afin de remédier à ces anomalies, qui perturbent d'une part le confort des spectateurs et d'autre part le bon déroulement des événements sportifs (ex. : homologation, trajectoire du ballon).

Par ailleurs les travaux qui portent sur **le confort thermique** des spectateurs dans les stades [Bouyer, 2004 ; Fiala *et al.*, 1999 ; Radunz, 2003] évoquent l'importance des échanges conductifs liés à la position assise des spectateurs, et mettent en avant que la position modifie le métabolisme : la production de chaleur métabolique des spectateurs assis est inférieure à celle de ceux qui sont en station debout [Armstrong, 1998].

Les études citées précédemment ont mis en évidence d'une part différentes approches d'évaluation du confort thermique en espaces extérieurs et semi-extérieurs et d'autre part les principales anomalies aérodynamiques qui caractérisent les stades étudiés. **Toutefois, les résultats des études** [Dufresne de Virel, 1995(1), 1995(2), 1995(3) ; Fiala *et al.*, 1999 ; Gandemer, 1994 ; Moreau, 2001 , Moreau 2002(1), 2002(2)]. **faites sur ces stades s'appliquent uniquement à ces cas particuliers, en conséquence ils ne sont pas adaptables à un contexte morphologique et climatique différent.**

C'est pourquoi la présente étude consiste à développer une approche méthodologique d'évaluation du confort, et en particulier du confort aérothermique des spectateurs dans les stades modernes.

Dans un premier temps, la démarche consiste à appréhender la notion de confort dans les espaces semi-extérieurs : une **zone de confort aérothermique** qui intègre les effets de la température et du vent sur le confort est définie. La zone est délimitée par des critères thermiques et mécaniques qui sont basés d'une part, sur les indices et les cartes de confort thermique applicables dans les espaces semi-extérieurs et d'autre part, sur un seuil lié à la gêne mécanique due au vent. Cette zone permet d'évaluer le confort aérothermique des spectateurs pour des valeurs de vitesse et de température associées.

Les facteurs climatiques, en particulier l'écoulement d'air et le rayonnement solaire sont affectés par l'architecture du stade. Les stades modernes sont classés en grandes familles morphologiques, ce qui sert de base pour le choix des configurations dans l'étude approfondie des caractéristiques aérodynamiques et d'ensoleillement.

Dans un deuxième temps, **l'impact de la morphologie** architecturale du stade **sur les caractéristiques de l'écoulement** d'air à l'intérieur du stade, notamment au niveau des tribunes est étudié. Pour cela une série d'essais paramétriques est effectuée sur de nombreuses configurations architecturales du stade dans une des souffleries à couche limite du CSTB Nantes. La vitesse du vent et son écart-type sont mesurés par la technique de l'anémométrie à fil chaud en de nombreux points situés au niveau des tribunes. Au cours des essais les paramètres suivants sont modifiés : l'inclinaison de la toiture, la porosité de la façade (proportion des ouvertures sur la façade), le débord de la toiture (vers l'extérieur ou vers l'intérieur) et le plan du stade (proportion liée à la fonction : football et athlétisme ou uniquement football). Les caractéristiques de l'écoulement sont décrites par des indices adimensionnels représentés par les variations de l'indice Ψ . L'indice Ψ intègre la vitesse moyenne et

son écart type dans un point i choisi au niveau des tribunes adimensionnés par la vitesse moyenne et l'écart type d'un point de référence placé en amont du stade à la hauteur d'un piéton, en zone dégagée. Les variations de l'indice Ψ caractérisent les conditions aérodynamiques moyennes au niveau de l'intégralité des tribunes et les conditions aérodynamiques "extrêmes" uniquement dans les zones concernées. Les conditions aérodynamiques "extrêmes" signifient les zones fortement ventilées ou celles de moindre ventilation.

Les résultats des essais paramétriques menés sur la maquette à géométrie variable sont adimensionnés par la vitesse moyenne et l'écart type au point de référence. Les corrélations éventuelles entre les paramètres morphologiques et les caractéristiques de l'écoulement peuvent permettre d'interpoler les résultats à des configurations possédant des caractéristiques morphologiques dans l'intervalle des gammes testées.

Ainsi, les variations de l'indice Ψ qui caractérisent l'écoulement au niveau des tribunes des différentes configurations sont **transposables aux cas réels**. Les valeurs adimensionnelles des différentes formes de l'indice Ψ sont interpolées pour les incidences du vent, et pour les variations de caractéristiques morphologiques non mesurées (dans l'intervalle des gammes étudiées).

Les fréquences d'occurrence de valeurs seuils de vitesse peuvent être calculées à partir des données météorologiques du site d'implantation du stade. Ces valeurs peuvent être associées à la zone de confort, ce qui permettra de définir **la période de confort aérothermique** sur la durée totale d'utilisation du stade. La durée des périodes d'inconfort (de différents types) peut également être calculée.

Une évaluation réelle du confort aérothermique basée sur la transposition des résultats des essais menés en soufflerie est appliquée. Cette transposition intègre les données climatiques du site de construction du stade et permet d'évaluer le confort aérothermique des spectateurs à partir de la zone de confort définie auparavant. Elle permet de hiérarchiser les configurations présélectionnées pour un site choisi et est ainsi destinée à être un outil d'intégration du stade dans son environnement climatique. Elle doit idéalement être employée dans la démarche de conception.

Le confort aérothermique des spectateurs est lié à la morphologie du stade; par ailleurs la géométrie de la toiture influe sur le confort visuel. Le confort visuel des spectateurs en lumière du jour est analysé à partir de l'uniformité d'éclairement de l'aire de jeu : il faut notamment éviter qu'un contraste accentué dû à l'ombre de la toiture apparaisse sur l'aire de jeu. Les conditions lumineuses au niveau de l'aire de jeu de dix configurations du stade comportant des toitures opaques dans différentes positions ou dimensions sont étudiées par un outil numérique pour trois positions géographiques. Cependant, les conditions lumineuses ne dépendent pas uniquement de la géométrie de la toiture mais

aussi de ses **caractéristiques photométriques**. Afin d'augmenter la période de conditions lumineuses uniformes au niveau de l'aire de jeu, une conception de méthode est mise en œuvre qui permet de définir **la morphologie photométrique de la toiture** dans le cas où une toiture entièrement couverte par un matériau transparent n'est pas favorable du point de vue du confort thermique. La localisation de la partie opaque, transparente ou translucide d'une toiture est déterminée par un outil expérimental appelé horizontoscope, en fonction de la position géographique du stade. Cette analyse complète l'évaluation du confort aérothermique.

Les exigences concernant l'ambiance acoustique dans les stades du point de vue de l'intelligibilité et du point de vue de "l'ambiance effervescente du match" semblent opposées. C'est pourquoi un système unifié de critères acoustiques ne s'est pas encore développé. De plus, tandis qu'entre les critères de confort thermique et de confort visuel il existe une interaction évidente (même si elle est complexe), entre ceux-ci et les critères de l'acoustique l'existence de ce genre de relation n'est pas encore démontrée.

CHAPITRE I.

ETAT DE L'ART :

APERÇU HISTORIQUE ET MORPHOLOGIQUE DES STADES, DU CONFORT AU VENT, DU CONFORT THERMIQUE, VISUEL ET ACOUSTIQUE

Ce chapitre vise

- *à tracer l'évolution des stades de l'antiquité à nos jours;*
 - *à caractériser en particulier le confort thermique, visuel et acoustique des spectateurs dans les stades;*
 - *à formuler les hypothèses du travail.*
-

1. HISTOIRE ET MORPHOLOGIE DES STADES DE L'ANTIQUITE A NOS JOURS

1.1 LA GENESE DU STADE - LE STADE GREC

Le combat a vocation sportive a pris naissance dans le monde méditerranéen vers le XV^e siècle avant J.-C. Dès cette époque, les Crétois prenaient plaisir à pratiquer la course à pied, le pancrace, le combat

contre les taureaux. Le stade est né en Grèce grâce aux activités sportives, plus précisément la course à pied, que les grecs pratiquaient le plus et qui était l'épreuve reine des compétitions des différents jeux.

Le stade constitue l'archétype originel de l'équipement sportif. Historiquement il est associé aux Jeux Olympiques qui apparaissent dans l'imaginaire collectif comme le mythe fondateur du sport. Le stade grec concrétise la codification de l'espace de compétition. En effet, le stade est étymologiquement, une distance : 600 fois le pied d'Héraclès, selon la mythologie, soit 192,27 mètres à Olympie. Cette distance est délimitée par une ligne de départ (*aphesis*) et une ligne d'arrivée (*terma*), d'abord indiquées par des poteaux, puis matérialisées par des blocs de pierre affleurant au niveau du sol [Vigneau, 1998].

Toutefois, les grands stades ou palais de sport actuels sont aussi fréquemment désignés par le terme «arène», qui évoque les amphithéâtres romains. En effet, le plus célèbre d'entre eux, l'amphithéâtre flavien, le Colisée annonce assez précisément, par ses proportions et sa capacité (50 000 places), les stades contemporains. Or, le stade, avec sa piste originellement rectiligne, est l'archétype des espaces destinés aux courses, alors que l'arène, avec sa fosse elliptique, est l'archétype des espaces destinés aux combats et aux spectacles [Vigneau, 1998]. Les premiers, espaces «linéaires», sont symbolisés par une ligne, selon la typologie de Vigneau. Tandis que, les derniers, espaces «surfaciens», sont présentés par un cercle, une ellipse, un carré ou un rectangle. Les stades contemporains semblent être le fruit d'un mariage entre ces deux archétypes.

La conception du stade grec n'était pas seulement dictée par les règles conventionnelles du sport. Elle était aussi inspirée par une recherche fonctionnelle visant à favoriser les performances des athlètes, et également à concilier capacité et visibilité. De cette manière la piste rectiligne du stade se rapprochait de l'ellipse de l'amphithéâtre romain, ainsi est né le plan «circo-rectangulaire» : piste rectiligne comportant des extrémités semi-circulaires. La Figure 1 montre le Stade de Delphes dont une des extrémités est semi-circulaire. La disposition et l'aménagement des tribunes ont évolué également : des gradins placés sur un seul côté de piste devenaient des gradins de forme U conçus en marbre en offrant plus de places aux spectateurs.

Le stade à l'époque classique ne constituait pas un bâtiment autonome, comme les stades contemporains : il faisait corps avec les édifices religieux et les autres édifices sportifs, réunis en véritable complexe sportif. Cette organisation spatiale était rendue nécessaire par le fait que le sport était indissociable des cérémonies religieuses qui l'accompagnaient. Mais au fil des siècles les stades s'éloignèrent de l'enceinte sacrée, gagnant ainsi leur autonomie. Ce phénomène peut être associé à une certaine laïcisation des jeux [Arena, 2003].



Figure 1 : Stade de Delphes [Delphes, 2002]

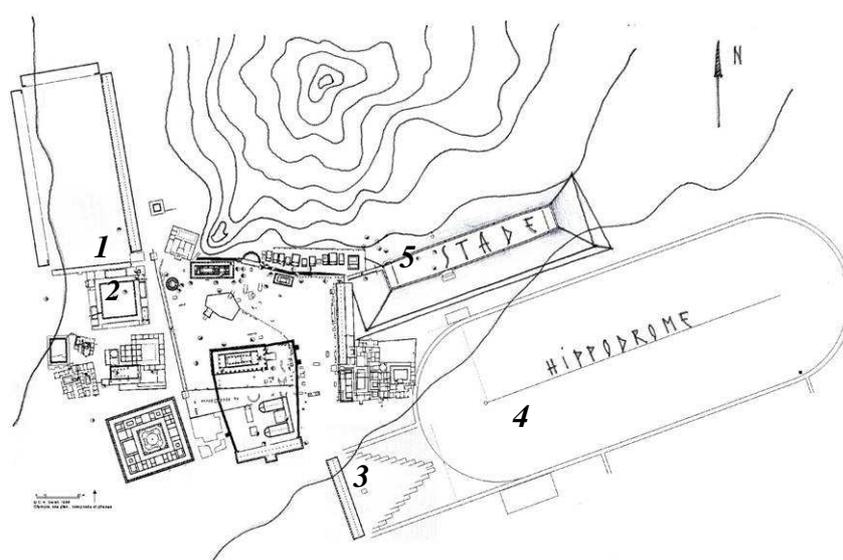


Figure 2 : Plan d'Olympie en 100 après J.-C. [Olympie, 2003]

A Olympie autour de l'*Altis*, bois sacré de Zeus, s'assemblaient les constructions nécessaires aux concurrents illustrées par la Figure 2 : le gymnase (1), la palestres (2) (édifice où les adultes s'adonnent à la gymnastique), les écuries (3), l'hippodrome (4), enfin le stade (5). Ce dernier s'étendait au pied du *Mont Kronion*, en rectangle régulier, entouré d'un remblai gazonné. Il existe toujours pratiquement dans son état originel.

A côté des stades, les gymnases étaient les principaux bâtiments de sport de l'antique Grèce. Les Figures 3 et 4 montrent ces espaces plurifonctionnels, souvent attachés aux stades, qui étaient les lieux d'entraînement des athlètes de haut niveau. Ils comportaient plusieurs espaces d'exercice, qui étaient soit ouverts et abrités par une toiture soutenue par des rangées de colonnes pour protéger les athlètes des intempéries et de la chaleur, soit couverts et clos.

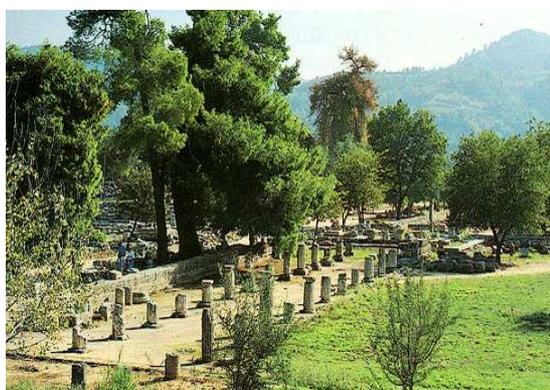


Figure 3 : Le gymnase à Olympie [Olympie, 2002]

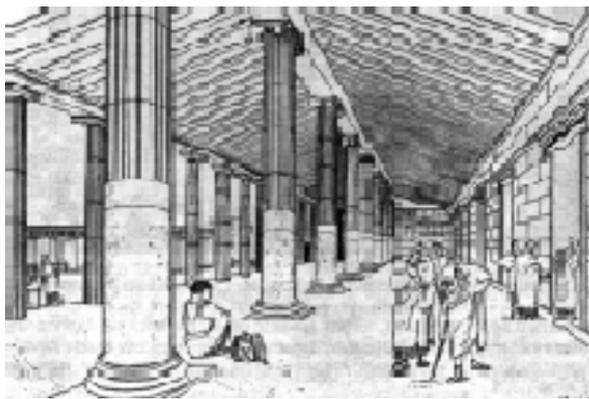


Figure 4 : Le gymnase à Priène [Arena, 2003]

Contrairement aux gymnases, les stades ne comportaient pas de toiture, de plus les premiers stades grecs ne comportaient pas de gradins non plus. Rien n'était prévu pour permettre une vue parfaite des concours, les spectateurs devant rester debout ou au mieux s'asseoir sur l'herbe. Certains stades n'offraient de tribune que sur un seul côté de la piste. Pour accueillir les spectateurs en nombre croissant, ils se sont progressivement dotés de tribunes en pierre de part et d'autre de l'axe longitudinal de la piste, puis également à une extrémité et enfin sur les quatre côtés. La Figure 5 montre un stade comportant des tribunes sur un seul côté. Les tribunes longitudinales sont généralement parallèles à la piste. Afin d'améliorer la visibilité latérale, dans certains stades grecs (Epidaure, Delphes), l'axe des tribunes longitudinales est légèrement incurvé.

La concavité de la tribune par rapport à l'axe de la piste permet de rapprocher l'axe théorique de vision (perpendiculaire à la ligne d'épaule) de la bissectrice de l'angle de vue utile pour suivre le déroulement de courses. Cette disposition est adoptée par de nombreux stades contemporains.

La Figure 6 illustre le rapprochement de l'axe théorique de vision à la bissectrice de l'angle de vue utile par l'incurvation de l'axe longitudinal des tribunes dans un point P .

Ils étaient aussi lieux d'hébergement, d'éducation et d'hygiène avec des bains et des salles de massage. De plus, les gymnases grecs offraient des espaces de discussion équipés de bancs, des salles de conférence, des jardins et des promenades qui en faisaient un lieu intellectuel: comme nous le racontent les dialogues de Platon, le philosophe Socrate aimait se rendre au gymnase pour admirer les jeunes athlètes et discuter avec ses disciples.

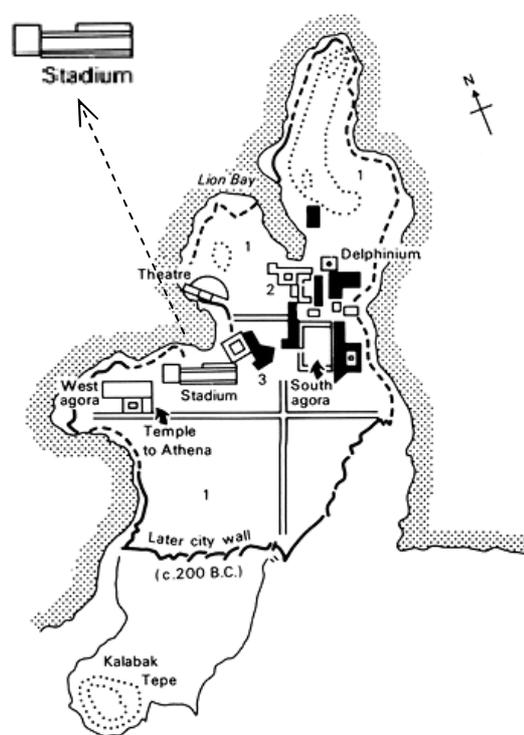


Figure 5 : Plan de Milet (Grèce) en 200 avant J.-C. [Milet, 2002]

Les traits mixtes représentent l'axe théorique de vision pour une tribune ayant un axe longitudinal parallèle à celui-ci de l'aire de jeu.

Les stades antiques grecs, à l'instar des théâtres, sont implantés sur le versant d'une colline (Delphes) ou au creux d'un vallon.

Lorsqu'il devient nécessaire de disposer le public tout autour de la piste, et qu'il n'est pas possible d'exploiter le relief naturel du terrain, les tribunes sont aménagées sur des talus réalisés en remblai.

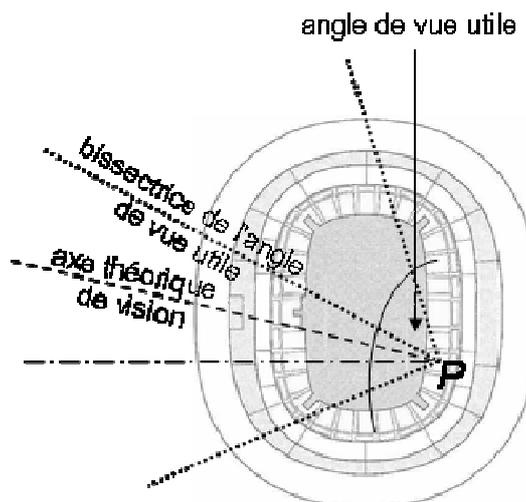


Figure 6 : L'effet de l'incurvation de l'axe longitudinal de tribune sur la visibilité latérale [John *et al.*, 2000]

La piste du stade étant rectiligne, l'introduction, en 724 avant J.-C., de la course de double stade (*diaulos*) contraint les coureurs à effectuer un ou plusieurs aller-retour, et donc un ou plusieurs virages à 180°. Cette contrainte fut éliminée par l'apparition de la piste circulaire constituée de deux lignes droites distinctes raccordées par des virages semi-circulaires. D'espace fini, la piste devient un espace de course sur des distances pouvant être infinies. Dès lors, la piste peut «s'émaner» de la distance de course conventionnelle : le stade pourrait ne plus mesurer un stade [Vigneau, 1998].

De manière à épouser les virages, certains stades grecs, puis les hippodromes grecs et les cirques romains présentent une extrémité semi-circulaire (stades de Delphes et d'Athènes) ou les deux (stade de Pompéi) annonçant le plan «circo-rectangulaire». Ce plan était adopté par plusieurs des premiers stades olympiques modernes : Londres – White City, Anvers, Paris, Londres – l'ancien Wembley; et par la plupart des stades comportant une piste d'athlétisme ou un vélodrome construits dans les années '20-'30 : Bologne, Florence, Stadium de Toulouse, Parc Lescure à Bordeaux etc.

1.2 L'AMPHITHEATRE ROMAIN

Les premiers amphithéâtres étrusques et romains sont «adossés» au relief du terrain. D'autres étaient réalisés dans des buttes dont le centre était évidé pour constituer la fosse et fournir les déblais nécessaires à l'aménagement des talus périphériques formant les tribunes [Arena, 2003]. La Figure 7 montre l'amphithéâtre de Pompéi qui était réalisé au creux d'un vallon.

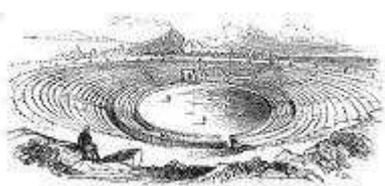


Figure 7 : Amphithéâtre à Pompéi
[Arena, 2003]

A Rome, du fait de la réticence de l'aristocratie vis-à-vis des spectacles de combats d'origine étrusque, les premiers amphithéâtres n'étaient que provisoires. Ils étaient donc érigés en bois. Il semble qu'il s'agisse là des premiers exemples de tribunes reposant non plus sur le relief (naturel ou aménagé) du terrain, mais sur une structure.

On peut considérer que cette évolution de l'amphithéâtre marque le passage du «statut» d'aménagement (à partir d'un site naturel dont la topographie est propice) à celui d'équipement (construction *ex nihilo* d'un édifice) [Vigneau, 1998].

A partir du I^{er} siècle avant J.-C., les premiers amphithéâtres reposant sur une structure composée de piliers et de voûtes en pierre sont édifiés en Campanie, en Istrie (Pula), puis à Rome.

Le progrès des techniques de construction offre une plus grande liberté dans la conception des tribunes et permet la recherche d'une meilleure «épure de visibilité» pour les spectateurs. Ainsi, au Colisée, illustré par les Figures 8 et 9, le troisième et dernier niveau de gradins est plus incliné que les niveaux inférieurs : 37°, soit à peu près la pente maximale des stades contemporains.

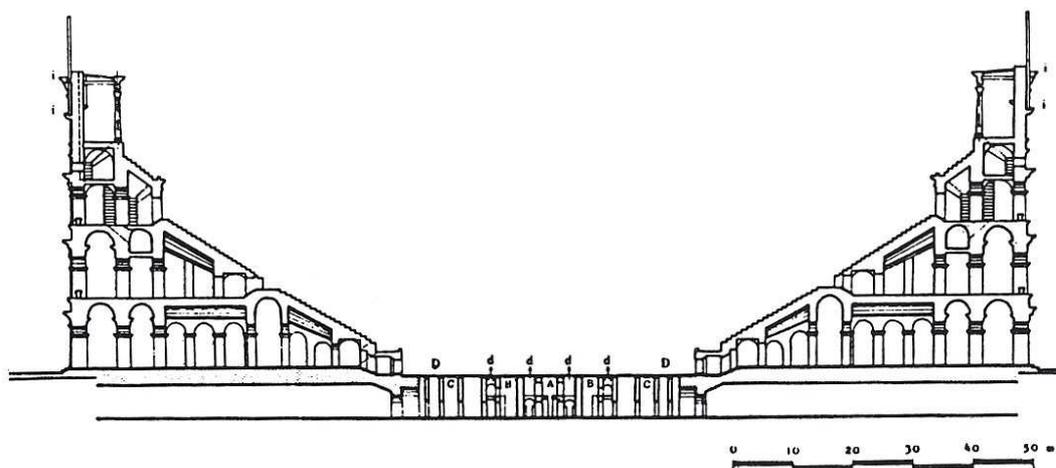


Figure 8 : Coupe de Colisée à Rome [Arena, 2003].

Ce profil à pente croissante, notamment parabolique, est adopté par les stades contemporains de grande capacité à une seule volée de gradins (sans balcon).

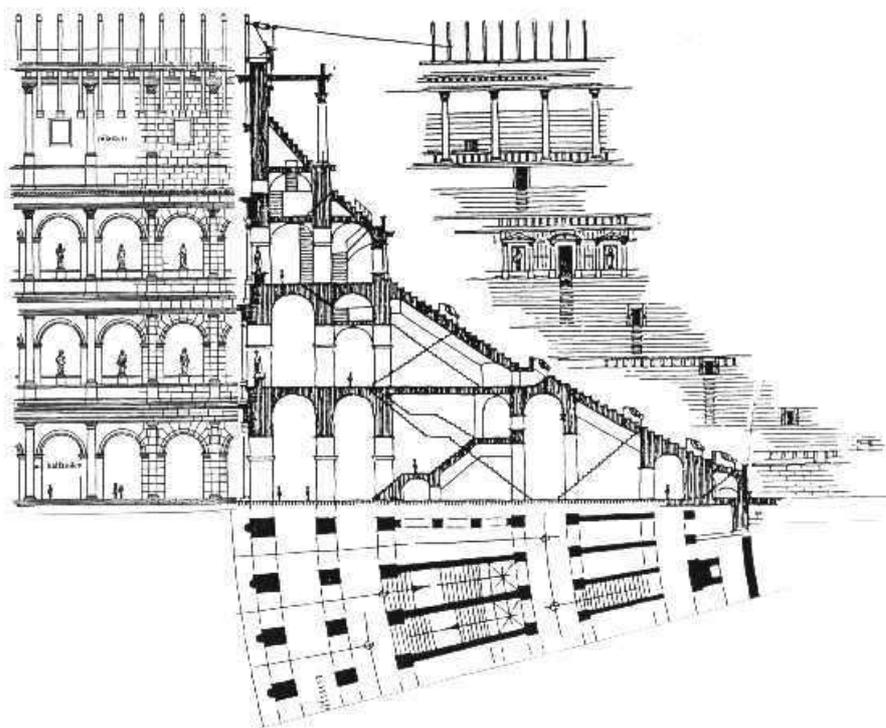


Figure 9 : Coupe et vues pivotées du Colisée à Rome [Arena, 2003].

L'amphithéâtre se compose de deux parties essentielles : une arène centrale elliptique (la piste), et un bâtiment en forme d'anneau tout autour (*la cavea*), qui représentait la substructure des gradins en pierre. On y accédait à travers des escaliers et des couloirs faisant le tour de l'édifice. Les spectateurs arrivaient par les vomitoires sur les gradins. Les vomitoires signifient, dans les stades actuels également, les ouvertures au niveau des gradins qui lient les gradins aux couloirs d'accès.

La Figure 10 illustre que l'ensemble de l'amphithéâtre est elliptique, d'un périmètre de 524 mètres avec des axes de 156 mètres et de 188 mètres. Sa hauteur est de 48,50 mètres. L'arène mesure 86 mètres sur 54 mètres. Afin de faciliter l'évacuation du public, les tribunes des amphithéâtres romains sont divisées en niveaux et en secteurs, desservis par un réseau dense d'escaliers (le plus souvent rayonnants), de circulation horizontales et de nombreuses issues, notamment des vomitoires répartis sur toute la circonférence. Au Colisée l'évacuation de 50000 spectateurs se faisait dans un délai de 8 minutes, qui est comparable à celui des stades contemporains.

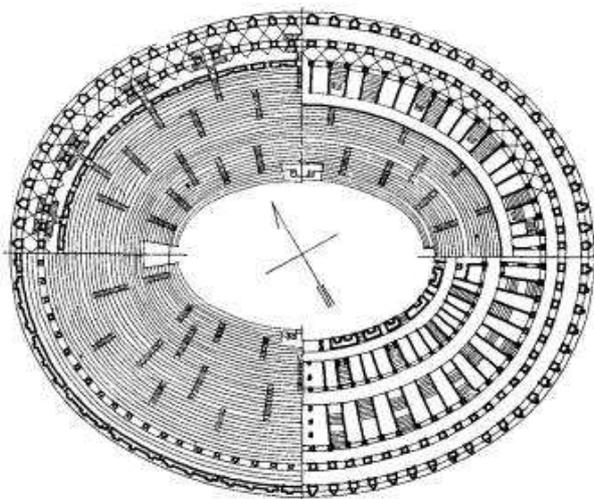


Figure 10 : Plan du Colisée [Colisé, 2002]

L'amphithéâtre était le lieu des spectacles de gladiateurs, de combats de fauves et parfois des spectacles nautiques, quand on inondait la fosse. La forme elliptique de l'amphithéâtre correspond clairement à sa fonction : l'allongement de l'arène est expliqué par la volonté d'améliorer la perception visuelle des combats. Les combattants devaient pouvoir se déplacer dans toutes les directions; car contrairement aux athlètes dans un stade ou aux chars dans un cirque, rien n'imposait une course dans une direction donnée [Vigneau, 1998]. Il fallait également que les spectateurs puissent se concentrer sur plusieurs paires de combattants luttant simultanément dans l'arène, contrairement à la corrida où l'attention ne se porte que sur un seul affrontement, celui du torero et du taureau — dans ce cas un plan circulaire convient parfaitement.

L'amphithéâtre romain a hérité certaines caractéristiques du théâtre romain. L'architecture du théâtre Marcellus anticipait celle du Colisée : les gradins du théâtre étaient divisés en trois rangées surmontés par un portique couvert, comme ceux du Colisée, et la façade semi-circulaire du théâtre à ordres superposés (dorique, ionique, et corinthien) couverte d'arcades permettait la circulation des spectateurs. Cependant la structure du Colisée est plus librement formée que celle du théâtre Marcellus : au Colisée ce sont des piliers qui remplacèrent les murs épais employés au théâtre, sauf au niveau des escaliers qui étaient flanqués de murs épais.

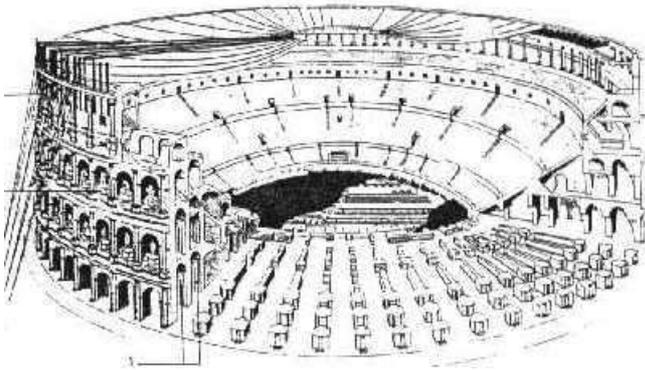


Figure 11 : Toile tendue du Colisée

Les premiers signes d'intention d'amélioration des conditions de confort thermique des spectateurs peuvent être découverts dans certains amphithéâtres romains (Colisée, Pompéi), où les spectateurs étaient protégés du soleil par une immense toile de lin amovible (*velum*) tendue. Ceci est illustré par la Figure 11.

Concernant la structure de la toiture du Colisée et son réseau de circulation il reste encore beaucoup de questions ouvertes. Plusieurs hypothèses existent sur la structure de la toiture, mais elle n'est pas encore connue en détails. Selon une hypothèse un réseau des cordages partant de mâts sur le pourtour de l'édifice s'étendait au dessus des gradins jusqu'à un anneau central. La toiture était manœuvrée par les marins en utilisant les treuils fixés sur les *cippes* de pierre implantés autour du Colisée, qui permettaient depuis le sol de lever l'anneau central. Les cordes devaient reprendre des forces très importantes dues au poids propre de la toile ainsi qu'à l'action du vent.

L'hypothèse que les dimensions de la toiture aient été plus modestes en protégeant uniquement la partie haute des gradins, ne semble pas justifiable car les places étaient distribuées selon le rang social: les personnes du rang le plus élevé en bas, les plus humbles, les femmes et les enfants en haut. Le volume entier de l'espace au-dessous des gradins étaient ouvert et servait à la circulation des spectateurs. La structure qui était poreuse se constituait de l'ensemble des couloirs périphériques continus. La Figure 12 illustre l'arcade du Colisée. Au contraire, les stades de nos jours ménagent à ces emplacements plus d'espaces fermés, comme les vestiaires, le club VIP, les salles d'exposition etc. en réduisant les espaces ouverts destinés à la circulation.

Grâce à l'épaisseur importante du bâtiment, la structure intérieure du Colisée constamment ombragée, ne suivait pas la fluctuation de température extérieure. Elle gardait une température significativement inférieure à la température extérieure et elle restait rafraîchie pendant toute la saison estivale.

La géométrie des espaces de circulation (couloirs composés d'espaces limités par des murs verticaux, ouverts aux extrémités, comportant des plafonds en pente etc.) favorisait la formation d'un effet cheminée, de sorte que l'air frais venant de l'intérieur du Colisée rentrait au niveau des tribunes à travers les vomitoires.



Figure 12 : Arcades du Colisée

Les amphithéâtres ont durement subi les changements de l'Antiquité tardive. Comme tous les monuments publics ils ont souffert des crises financières et édilitaires et de la disparition du patronage dans les provinces. Les spectacles se raréfient car les gladiateurs et les bêtes sauvages deviennent trop onéreux à entraîner ou à acheminer d'Afrique [Arena, 2003].

Dès le IV^e siècle les mentions de travaux au profit des édifices de spectacle se raréfient même si des jeux sont encore organisés. On embellit les églises au détriment des édifices de spectacle. Au V^e siècle la plupart des amphithéâtres ne sont plus utilisés régulièrement.

Mais, si les amphithéâtres ne sont plus le lieu des combats de gladiateurs (*munera*) et de chasse du gibier à poil (*venatione*), ils seront souvent réutilisés au Moyen Âge, devenant même des places fortes, comme ce fut le cas à Arles. Le Moyen Âge et l'époque moderne sont en effet caractérisés par une activité ludique extrêmement diversifiée, mais on ne trouve plus d'activité sportive unificatrice, comme les Jeux Olympiques grecs ou les Jeux romains.

L'amphithéâtre, devenu trop grand pour les spectacles de sport, qui n'a plus la même valeur que chez les Anciens, change de fonction : il est réutilisé au Moyen Âge à d'autres fins ou il est abandonné. Des exercices des anciens, il nous reste les vestiges toujours admirés des stades et des amphithéâtres. Au Moyen Âge et à l'époque moderne, on ne construit plus d'équipements ludiques et sportifs de cette ampleur.

1.3 BATIMENTS INFLUENCANT L'ÉVOLUTION DU STADE

Au cours de son évolution la forme, la fonction et la structure du stade grec ont été influencées par divers édifices illustrés par la Figure 13, comme le cirque romain, le théâtre grec et romain, l'arène (le lieu de la tauromachie), l'hippodrome et l'amphithéâtre. Grâce à leurs influences, progressivement le stade ancien se développa jusqu'au stade multifonctionnel de nos jours.

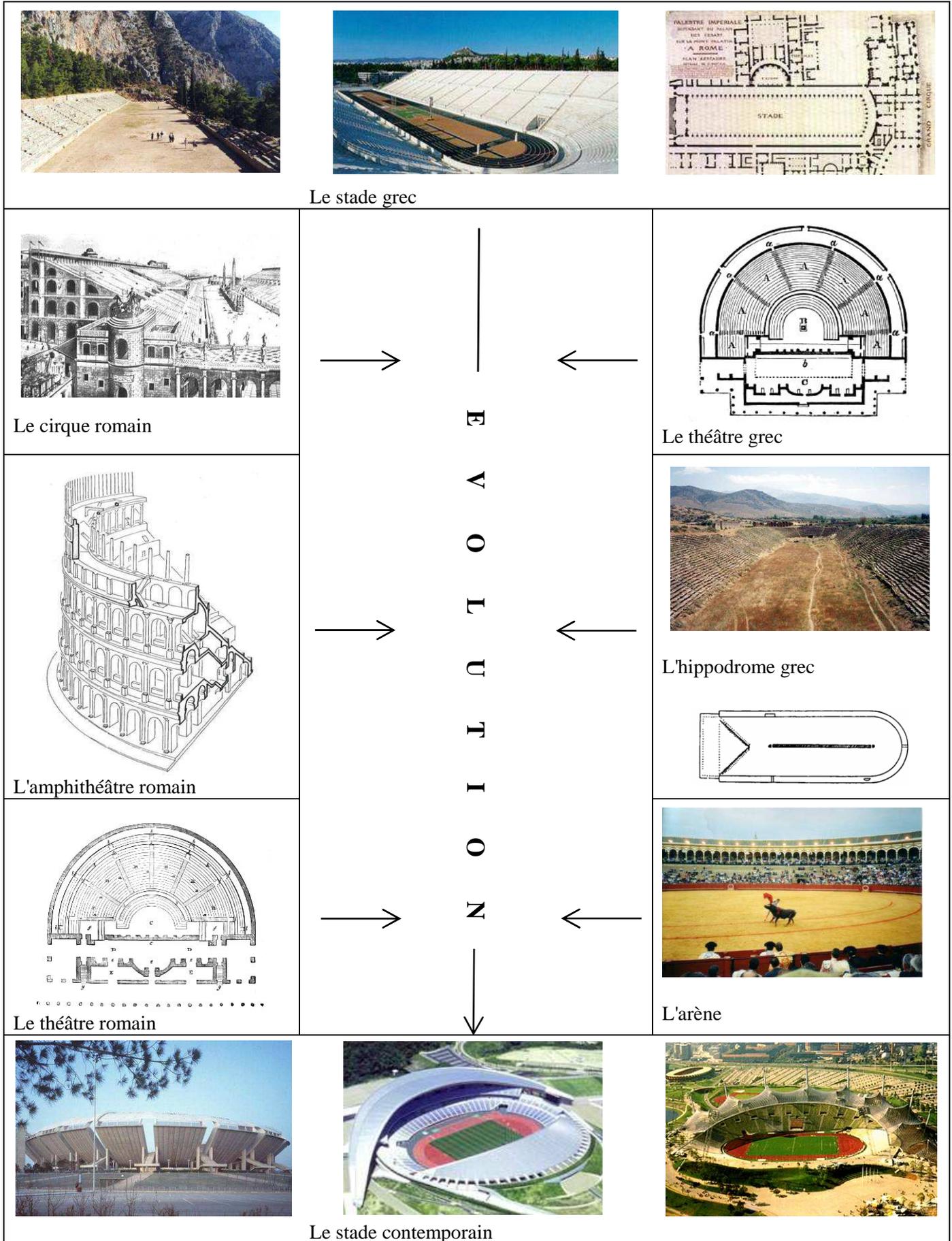


Figure 13 : Influence de bâtiments de fonction diverses sur l'évolution du stade

L'archétype des pistes aux longues lignes droites et aux courbes serrées se développe avec l'hippodrome grec, puis avec le cirque romain. La séparation entre les lignes droites est alors marquée par un long muret (*spina*). Cet archétype est remis à l'honneur lors des premiers Jeux Olympiques de l'ère moderne (à Athènes en 1896), le stade antique Panathénéique étant reconstitué *in situ*.

L'hippodrome grec est une arène destinée aux courses de chevaux et de chars, par opposition au stadium, qui était approprié à la course à pied. Dans l'hippodrome l'espace occupé par les spectateurs ne portait pas sur des corridors voûtés, et ne formait pas une œuvre d'architecture comme dans le cirque romain. Il se constituait d'habitude de degrés taillés dans le flanc d'une montagne, ou si l'arène était sur un terrain plat, de levées de terre. Au milieu de l'arène il y avait une barrière (*spina*) qui la divisait en deux parties, comme *la spina* romaine, mais plus simple et moins décorée, consistant simplement en une levée de terre.

Le cirque romain se composait d'un ou plusieurs étages d'arcades, par lesquelles les spectateurs arrivaient aux escaliers qui conduisaient à l'intérieur du bâtiment. Au centre du cirque il y avait une séparation balisée par des colonnes et des obélisques.

Le théâtre grec, comme les stades grecs, était ordinairement placé sur la pente d'une colline, afin de pouvoir s'y établir plus facilement, en taillant dans les flancs mêmes de la montagne, les sièges des spectateurs. L'intérieur du théâtre (*cavea*) qui était formé par plusieurs rangées concentriques de gradins, n'était guère qu'une excavation et n'avait pas de façade extérieure.

Le théâtre romain était bâti sur un terrain plat. C'était un bâtiment autonome, qui se composait de gradins entourés par un ou plusieurs étages d'arcades superposées. Ces dernières formaient une enceinte semi-circulaire et livraient passage aux spectateurs. Les escaliers pratiqués dans l'épaisseur du bâtiment conduisaient à des rangs des sièges. En haut de chaque escalier étaient implantées des portes qui donnaient sur les corridors qui descendaient vers l'orchestra (qui correspondait au parterre) et la scène. Les théâtres romains conçus à l'instar des théâtres grecs, ne comportaient pas de toit, néanmoins il existait des théâtres couverts par un toit permanent, appelés "odéons".

L'arène, le lieu de la tauromachie, par contre, avait une toiture couvrant une partie des gradins et protégeant les spectateurs du soleil. Les billets sont, encore aujourd'hui, vendus en fonction de l'ensoleillement : "sol", place ensoleillée et "sombre", place ombrée, ce qui met en évidence l'importance des éléments climatiques sur le confort des spectateurs. La forme circulaire de l'espace central de l'arène est liée à la fonction : il permet aux spectateurs de bien suivre le spectacle quel que soit leur emplacement.

1.4 LES STADES CONTEMPORAINS

1.4.1 Orientation du stade

Le stade contemporain est donc le fruit d'un curieux métissage de deux archétypes : du stade grec, espace destiné à la course et de l'amphithéâtre romain, espace destiné au combat. Cependant, l'équipement sportif que nous appelons stade aujourd'hui évoque d'avantage les amphithéâtres romains que les antiques stades grecs. Selon les lieux et les époques, le stade contemporain a emprunté tel ou tel caractère de ces deux archétypes architecturaux, la combinaison de ces éléments donne aujourd'hui une très grande diversité de bâtiments [Vigneau, 1998]. Le renouveau des Jeux Olympiques de 1896 grâce à l'initiation du baron Pierre de Coubertin, avec la restauration du stade Panathénique d'Athènes a été le moteur de la multiplication des stades à vocation sportive [Arena, 2003]. L'architecture du stade évolue et s'adapte aux contraintes du sport moderne. Plus tard les stades deviennent des espaces multifonctionnels, qui accueillent différents spectacles et divertissement à l'instar du modèle romain. En conséquence, la question du confort des usagers, en particulier celui des spectateurs devient une préoccupation majeure.

La notion de confort dans ces espaces semi extérieurs est fortement liée à la morphologie du stade qui peut modifier l'effet des caractéristiques climatiques du site. La morphologie contient non seulement la forme, la structure et les matériaux employés mais encore certaines caractéristiques d'implantation, par exemple l'emplacement du stade sur le site et son orientation. Le choix de l'orientation de l'axe principal du stade dépend d'une part de la fonction du stade, d'autre part des caractéristiques climatiques du site d'implantation.

Les exigences concernant l'orientation, liées à la fonction du stade peuvent être définies pour chaque type de sport. Cependant, un axe commun orienté nord-15°-ouest, est accepté comme pertinent pour la majorité des sports. La Figure 14 illustre cet axe commun *A* et également les axes préférables selon le sport pratiqué dans le stade.

La Figure 14 montre que pour le football et le rugby l'orientation préférée de l'axe longitudinal se situe dans l'intervalle *B* :

75° – nord – (-20°),

tandis que l'orientation la plus avantageuse pour tous les jeux joués sur un terrain se situe dans l'intervalle *C* :

45° – nord – (-20°) [John *et al.*, 2000].

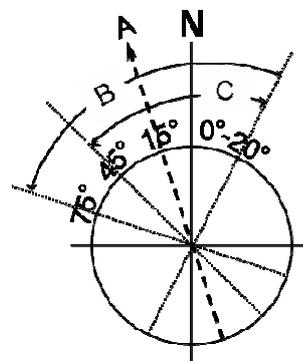


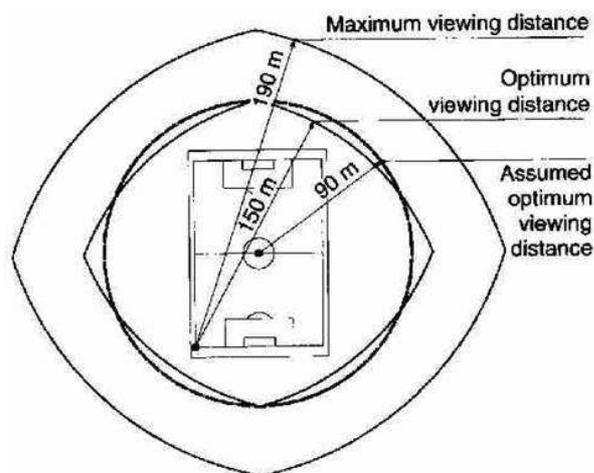
Figure 14 : Orientations recommandées de l'axe longitudinal du stade : *A* – axe favorable commun pour la majorité des sports; *B* – intervalle acceptable pour le football et le rugby; *C* – intervalle le plus avantageux pour les jeux joués sur un terrain [John *et al.*, 2000].

Le but recherché par une bonne orientation est d'éviter que les joueurs, les compétiteurs et si possible les spectateurs, aient le soleil levant ou le soleil couchant dans les yeux pendant les événements sportifs. Ainsi habituellement, la tribune présidentielle d'un stade avec un axe longitudinal orienté nord-sud est la tribune ouest qui n'est pas perturbée par le soleil couchant pendant les matches joués en fin d'après midi.

1.4.2 Conception des tribunes

La réalisation des tribunes s'attache à deux critères fonctionnels présents depuis l'époque romaine: **concilier capacité et visibilité.**

- La capacité est évaluée en fonction du type d'événement que va recevoir le stade et des moyens financiers disponibles [John *et al.*, 2000].
- La pente des tribunes ne doit pas dépasser un seuil d'environ 34° pour éviter les débordements de foule et les sensations de vertige [John *et al.*, 2000].
- "Le public doit à la fois ne pas être ébloui par le soleil, ne pas être gêné par des éléments de structure et les têtes des spectateurs des rangs inférieurs, mais surtout être assez proche de l'aire de jeu pour distinguer les mouvements de la balle [Bouyer, 2004].



Pour le football et le rugby, le ballon a un diamètre de 250 mm, la distance maximale (distance entre un point de la tribune et le coin opposé du terrain) est d'environ 150 m [John *et al.*, 2000]. La Figure I.1.27. montre les distances de vue maximales, minimales et optimales par rapport au coin du terrain et par rapport au point central de celui-ci.

Figure 15 : Distances de vue minimales optimales et maximales par rapport au point central du terrain, et au coin du terrain [John *et al.*, 2000].

La Figure 16 illustre les endroits préférés par les spectateurs (zones grisées) sur les tribunes. Ils se trouvent en général au niveau des tribunes latérales qui sont parallèles à l'axe longitudinal de l'aire de jeu, près du terrain et au niveau des extrémités, directement derrière le but pour voir les actions les plus intéressantes.

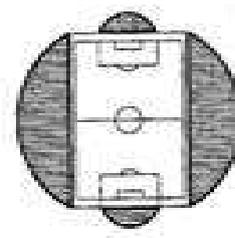


Figure 16 : Positions préférées pour suivre le match d'après les supporters [John *et al.*, 2000].

Ces critères doivent être respectés dans la conception des tribunes qui est également déterminée par la forme du terrain ou celle de la piste.

La géométrie de la piste du stade, initialement rectiligne, se rapproche de l'ellipse d'amphithéâtre. Ce processus commence par l'introduction de la double course du stade au VI^{ème} siècle avant J.-C., et résulte en l'arrondissement des virages. Plus tard, les tribunes deviennent concaves afin de fournir de meilleures conditions de visibilité. Les tribunes évoluent en parallèle à la piste. Selon le **plan de la piste et des tribunes** Vigneau distingue quatre groupes de stades [Vigneau, 1998] :

- Plan **rectangulaire**, où les tribunes sont disposées autour de la piste de telle manière que, les axes des tribunes longitudinales soient parallèles à l'axe longitudinal de la piste, et ceux des tribunes situées aux extrémités soient parallèles à l'axe transversal de la piste. Ce plan est adopté par de nombreux stades anglais de football (Old Trafford à Manchester, Villa Park à Birmingham, Arsenal à Highbury etc.) et aussi de rugby (Kilmarnock Stadium illustré par la Figure 17, Twickenham à Londres), par plusieurs stades du continent (Geoffroy-Guichard à Saint-Etienne, les Costières à Nîmes etc.) et par quelques stades américains couverts.



Figure 17 : Stade Kilmarnock, Ecosse [Worldstadiums, 2002]



Figure 18 : White City Stadium, Londres

- Plan «**circo-rectangulaire**», où la piste rectangulaire est complétée par deux extrémités semi-circulaires. Il est adopté par de nombreux stades conçus au début du XIX^e siècle. Parmi les exemples on trouve plusieurs des premiers stades olympiques : le Wembley et le White City Stadium à Londres (Figure 18), les stades d'Anvers et de Paris. La majorité des stades comportant une piste d'athlétisme ou un vélodrome construits dans les années 1920-1930 appartient également à ce groupe (Stadium de Toulouse, Parc Lescure à Bordeaux etc.).

Les stades de plans **circo-rectangulaire interrompus** représentent un sous-groupe de cette catégorie dont le stade Panathénique d'Athènes (Figure 19) est l'exemple le plus célèbre.



Figure 19 : Stade Panathénien, Athènes

- Plan de **tribunes d'axes longitudinaux incurvés**, où la piste rectangulaire est entourée par des tribunes qui possèdent des axes longitudinaux légèrement incurvés afin d'améliorer la visibilité. La concavité des tribunes, qui d'ailleurs peut être observée sur les stades grecs antiques, permet d'approcher l'axe théorique de vision (perpendiculaire à la ligne d'épaule) de la bissectrice de l'angle de vue utile. Parmi les exemples on trouve le Stade de la Beaujoire à Nantes, le Stade de France à Saint-Denis, le Parc des Princes à Paris (Figure 20).



Figure 20 : Parc des Princes, Paris [Parc des Princes, 2002]

Par l'absence d'une extrémité un sous-groupe est créé : **tribunes d'axes longitudinaux incurvés interrompus**. Ce groupe est représenté par les stades américains du plan de forme de fer à cheval (exemple : Ohio Stadium).

- Plan **elliptique**, où la piste est cernée par des tribunes ayant un contour elliptique (Figure 21). Les stades de ce groupe sont inspirés par un des deux archétypes, les amphithéâtres romains. Ils illustrent bien que la morphologie d'espace «idéal» du spectacle n'a pas subi de grandes modifications depuis les 1800 dernières années! On y trouve la plupart des stades Olympiques (Berlin, Rome, Mexico, Munich etc.), de nombreux stades européens comportant une piste d'athlétisme (Chalety à Paris, San Siro à Bari, Goteborg, Leipzig etc.), plusieurs stades sud-américains d'athlétisme et de football (Morumbi à Sao Paulo, River Plate à Buenos Aires etc.) et de football (Maracana à Rio de Janeiro - Figure 21) et de grands stades de football américain (Rose Bowl à Pasadena, Cotton Bowl à Dallas etc.).



Figure 21 : Stade Maracana, Rio de Janeiro

1.4.3 Structure et matériaux des tribunes

La structure des premières tribunes dans les stades contemporains, à l'instar des premiers amphithéâtres étrusques, était aménagée en bois. Ces stades possédaient des places debout, qui correspondait à une tradition populaire, favorisant la cohésion, la ferveur, les chants. Leur utilisation perdura longtemps, avant que plusieurs drames liés à des mouvements de foule (surcharge de structure) ne conduisent à leur interdiction. Plus tard, les progrès techniques et technologiques dans les domaines des matériaux - en particulier le béton armé et l'acier -, et des moyens de calcul de structures ont permis la réalisation de tribunes superposées en importants porte-à-faux, rapprochant ainsi les spectateurs de l'espace sportif. La Figure 22 illustre les tribunes chevauchées du Stade de Manchester.

A partir des années 40, début de la construction de stades de grande capacité, les stades comportent généralement **plusieurs niveaux de tribunes** en balcon. Toutefois, le chevauchement d'une tribune par l'autre ne peut guère être très profond de manière à ménager une vue verticale suffisante au-dessus du terrain.

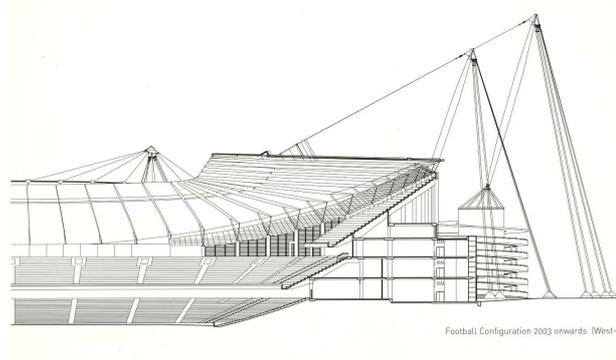


Figure 22 : Tribunes chevauchées réalisées en trois niveaux - Stade de Manchester [Arup, 2002]

La coupe des tribunes à une seule volée, à l'exemple des amphithéâtres romains, suit une courbe parabolique, de manière que la pente des tribunes augmente avec la hauteur. Elle peut atteindre au maximum 34° . Le but d'un profil à pente croissante des tribunes est d'optimiser capacité et visibilité. Toutefois, l'accroissement de capacité est limité par l'éloignement des spectateurs par rapport au terrain.

Les tribunes peuvent être segmentées non seulement horizontalement (plusieurs niveaux de balcons), mais aussi verticalement. Le plus bel exemple de division des tribunes par des brèches ou failles verticales est le Stade Saint Nicola à Bari en Italie, conçu par Renzo Piano. Il répond par une solution élégante à la fois aux exigences de sécurité, notamment à la séparation des spectateurs de groupes adversaires, et à celles de confort thermique, en particulier en période estivale, permettant une **irrigation homogène de l'air à travers les brèches verticales** [T et A, 1990-1991]. La Figure 23 montre que ces dernières sont complétées par une séparation horizontale qui divise les tribunes en deux parties : la partie inférieure, encaissée au sol et la partie supérieure, qui porte la toiture supportée par des piliers et des appuis obliques.

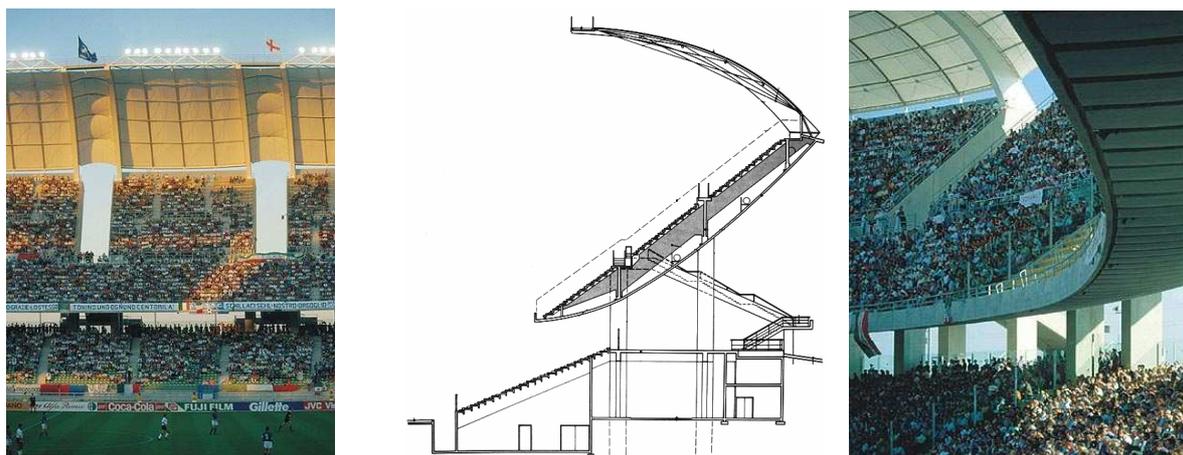


Figure 23 : Vues d'intérieur et coupe du Stade Saint Nicola à Bari [PRBW, 2002 ; Sturzebecher et Ulrich, 2001]

Les tribunes basses des stades contemporains sont souvent encaissées au sol, ce qui permet d'une part un remplissage des gradins (par les spectateurs) plus efficace et d'autre part, une intégration de l'objet bâti plus harmonieuse dans son environnement.

1.4.4 Conception des toitures

Les premières toitures étaient conçues afin de protéger les spectateurs des amphithéâtres romains des intempéries : le Colisée comportait un toit immense de lin amovible tendu. Les premières tribunes couvertes modernes semblent apparaître sur les hippodromes, puis sur les stades d'athlétisme, de football et/ou rugby au XIX^e siècle. La toiture, l'élément architectural du stade le plus marquant, signifie souvent un grand défi de design de structure et détermine le caractère du bâtiment.



Figure 24 : Poteaux supportant la toiture du Stade White City à Londres

Au début du XX^e siècle faute de pouvoir réaliser d'importants porte-à-faux, la **charpente de toiture** devait être **soutenue par des poteaux implantés en avant ou au milieu des tribunes** [Schmidt, 2004]. Ces derniers nuisent à la vue des spectateurs. La Figure 24 montre le Stade White City à Londres dont la toiture de structure en acier est soutenue par des poteaux en acier.

La Figure 25 montre que **les structures métalliques permettaient de porter des charges** non seulement transversalement, mais aussi **longitudinalement** par des poutres à treillis, qui s'appuyaient sur des poteaux disposés de part et d'autre des tribunes à "l'anglaise" : Stade de Gerland à Lyon, Aston Villa à Bristol etc.



Figure 25 : Stade de Gerland à Lyon [Gerland, 2003]

Souvent dans ces stades seules les tribunes latérales, les tribunes de prestige sont couvertes et les extrémités sont laissées ouvertes. **Les stades actuels par ailleurs montrent une tendance à couvrir la plupart de leurs gradins par une toiture en protégeant de plus en plus les spectateurs des intempéries.** La réalisation des toitures qui couvrent l'intégralité des tribunes sans avoir besoin de s'appuyer sur des poteaux, ne relève plus de si grands défis grâce aux technologies modernes de construction et de design.

La fonction protectrice et modificatrice des caractéristiques climatiques de **la toiture** est très complexe. D'une part elle **protège les spectateurs principalement des facteurs climatiques**, notamment :

- **du vent;**
- **des précipitations;**
- **du soleil;**

Selon une classification des formes de toiture on peut distinguer trois catégories illustrées par la Figure 26 :

- toitures comportant des lignes de bords horizontales (1);
- toitures comportant des lignes de bords de hauteur variée (2);
- toitures comportant des lignes de bords horizontales et de hauteur variée (3).



Figure 26 : Classification des toitures selon la nature de ses lignes de bords

L'incurvation des lignes de bords détermine la surface, en conséquence la toiture est montante, descendante vers l'aire de jeu, ou horizontale. Il est évidemment possible de construire une toiture de forme irrégulière. La plupart des stades contemporains ont une toiture légèrement inclinée, ce qui est favorable du point de vue du drainage de la pluie sur la surface de toiture.

Les toitures des stades peuvent être classées selon leur plan :

- toitures continues;
- toitures discontinues.

Les figures 27 et 28 illustrent un stade de toiture continue et un autre de toiture composée de deux parties qui couvrent les tribunes latérales.



Figure 27 : Stade Incheon en Munhak, Japon [Worldstadiums, 2002]

Figure 28 : Stade Wing à Kobe, Japon [Worldstadiums, 2002]

Au cours du temps, une nouvelle génération de stades s'est développée (qui d'ailleurs ne relève pas du sujet de la présente étude) comme un perfectionnement du concept de couverture de l'intégralité des tribunes. Ces nouveaux stades présentent des toitures rétractables ou amovibles de structure rigide ou souple. L'un des premiers à avoir promu l'idée du passage d'un stade à ciel ouvert à un stade fermé a été l'architecte français, Robert Taillibert dont l'œuvre la plus connue est le Stade de Montréal illustré par la Figure 29. La couverture de toile tendue couvre l'aire de jeux et la piste d'athlétisme du stade [Schmidt, 2004].

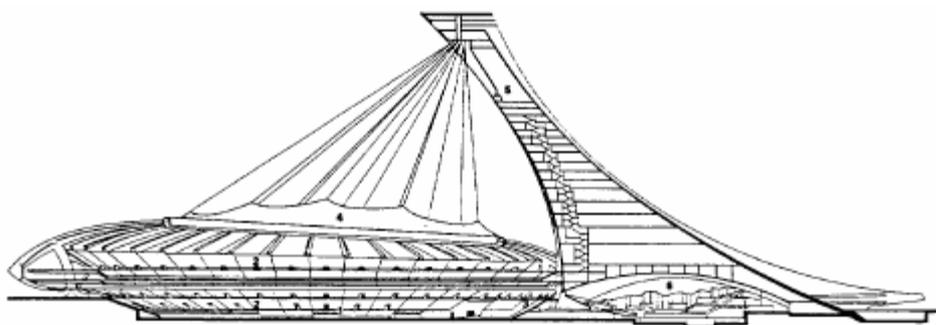


Figure 29 : Stade de Montréal [Schmidt, 2004]

Ainsi non seulement les spectateurs, mais encore les joueurs et les compétiteurs sont protégés des facteurs climatiques. Cette solution est surtout pratique en climats froids ou continentaux où faute de fermeture complète du stade l'activité sportive devrait être suspendue pendant une certaine période de l'année.

L'aperçu de l'évolution des stades de l'antiquité à nos jours apporte plusieurs enseignements :

- La notion de confort dans ces espaces est originaire du modèle romain où les spectateurs ont été protégés du soleil par une toile immense.
- Les amphithéâtres romains présentent des caractéristiques climatiques, en particulier liés à l'écoulement de l'air : la structure percée du Colisée permettait l'irrigation des tribunes par l'air rafraîchi dans la structure épaisse du bâtiment. Ainsi était amélioré le confort aérothermique des usagers.
- La qualité de l'ambiance dans ces espaces semi extérieurs est fortement liée aux paramètres climatiques qui peuvent être modifiés par la morphologie du stade, en particulier son orientation, la continuité ou la discontinuité des gradins, l'inclinaison de la toiture, le taux d'ouverture sur la façade (porosité).
- Parmi les paramètres climatiques ce sont le vent et le rayonnement solaire qui sont les plus susceptibles d'être modifiés par la morphologie du stade.

2. LA NOTION DE CONFORT DANS LES STADES

La notion de confort en espace extérieur et semi extérieur diffère de celle qui prévaut en espace intérieur : les conditions sont contrôlables en espace intérieur, tandis qu'en espace extérieur ou semi extérieur ces conditions sont soit modifiables, soit non contrôlables. En conséquence les attentes de l'individu par rapport à l'ambiance extérieure se situent dans une gamme plus étendue que celles de l'ambiance thermique intérieure.

Les stades représentent une sorte de transition entre les espaces extérieurs et intérieurs et sont en conséquence classés en espaces semi extérieurs [Spagnolo *et al.*, 2003]. Ils comportent des éléments structurels qui modifient l'effet des facteurs climatiques (exemple : un mur qui protège du vent ou une toiture qui ombre les tribunes), cependant les spectateurs restent en partie exposés aux facteurs climatiques et en particulier au vent, à la température, au rayonnement solaire, à l'humidité et aux précipitations. Parmi ces facteurs ce sont le vent et le rayonnement solaire qui peuvent être modifiés dans la plus large mesure par les éléments structurels, de manière plus générale par la morphologie architecturale du stade.

Le vent représente une des différences les plus importantes entre les ambiances extérieures et intérieures et **il est un facteur qui modifie significativement les conditions de confort dans les stades.** Même une brise légère dépasse largement les vitesses d'air rencontrées en ambiance intérieure.

L'effet du vent sur les individus est de deux sortes :

- **L'effet mécanique** qui est l'effet direct de la force du vent exercée sur les individus et sur les objets comme les parapluies, les papiers ou la poussière etc. L'effet mécanique de la vitesse de vent et les forces correspondantes sont décrits par l'échelle de Beaufort.
- **L'effet thermique** est l'effet indirect du vent ayant un impact sur le confort thermique quand il est combiné avec la température de l'air, l'humidité relative et le rayonnement solaire.

Le rôle du vent est non seulement primordial du point de vue des nuisances mécaniques et du confort thermique des individus, mais il doit également être considéré dans l'homologation des résultats d'athlétisme : la vitesse du vent au niveau de la piste ne doit pas dépasser 2 m/s pour les compétitions d'athlétisme combinées. Du point de vue de la ventilation de la pelouse la vitesse doit être supérieure à 1.6 m/s [Dufresne, 1995 (1)].

2.1 CONFORT AU VENT

2.1.1 Approche générale du confort au vent

Le vent est un écoulement qui tend à équilibrer les zones de pression différentes dans l'atmosphère. Dans les basses couches atmosphériques il est freiné par la rugosité du sol qui crée des agitations turbulentes. La vitesse du vent étant une grandeur vectorielle elle varie en intensité et en direction au cours du temps. Instantanément, le vecteur vitesse du vent $\vec{U}(t)$ peut être décrit par ses trois composantes $u(t)$ (composante longitudinale orientée suivant la direction et le sens du vent moyen), $v(t)$ (composante transversale) et $w(t)$ (composante verticale). Le vent est alors considéré comme la superposition d'un **écoulement moyen**, $\vec{U}(\bar{u},0,0)$ mesuré sur une période de temps T assez longue (T = 10 minutes, par exemple, pour les enregistrements météorologiques) et d'un **écoulement fluctuant** fonction du temps $U'(t)[u'(t),v'(t),w'(t)]$

$$U(t) = \vec{U} + U'(t) \quad \text{[Équation 1]}$$

La composante vitesse moyenne du vent mesuré sur une période de temps T :

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad \text{[Équation 2]}$$

La moyenne des composantes fluctuantes est égale à 0 par définition :

$$\overline{u'(t)} = \overline{v'(t)} = \overline{w'(t)} = 0 \quad \text{[Équation 3]}$$

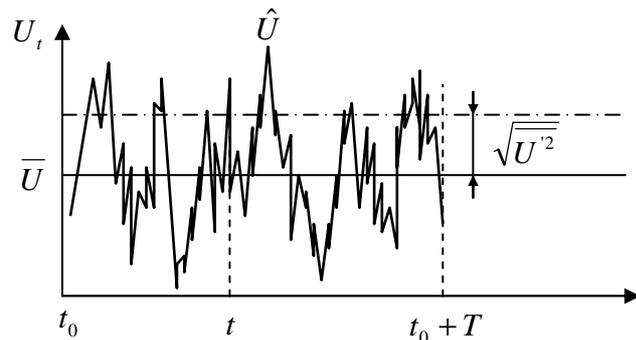


Figure 30 : Enregistrement du vent instantané en fonction du temps

La turbulence, en d'autre termes la dispersion de la vitesse autour de sa valeur moyenne est caractérisée sur la période T par l'écart type de la fluctuation (σ) :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u'^2(t) dt} \quad \text{[Équation 4]}$$

La turbulence est essentiellement fonction de la rugosité.

Le σ rapporté à la vitesse moyenne indique l'intensité de turbulence :

$$I = \frac{\sigma}{U} \quad \text{[Équation 5]}$$

La vitesse de pointe du vent, \hat{U} , sur la période T vaut approximativement :

$$\hat{U} \cong \bar{U} + 2.9\sigma \quad \text{[Équation 6]}$$

La vitesse du vent varie en fonction de la rugosité du sol, de la topographie éventuelle du site et de la hauteur z . La vitesse moyenne du vent à la hauteur z est exprimée par l'équation suivante :

$$\bar{U}_z = k \cdot \ln \frac{z}{z_0} \bar{U}_{10\text{météo}} \quad \text{[Équation 7]}$$

où

k est le facteur caractéristique de la nature de terrain;

z_0 est la hauteur de rugosité, qui indique la hauteur où la vitesse moyenne égale à 0 ($\bar{U}_{z_0} = 0$);

\bar{U}_z est la vitesse moyenne du vent à la hauteur z ;

$\bar{U}_{10\text{météo}}$ est la vitesse moyenne du vent à la station météorologique à 10 mètres de hauteur.

Le Tableau 1 illustre quatre types de terrain distingués dans l'Eurocode selon les caractéristiques de rugosité du site [Eurocode Partie 2-4; 1995]. Le tableau contient notamment :

- les valeurs de k , le facteur caractéristique de la nature de terrain;
- les valeurs de z_0 , la hauteur de rugosité;
- les valeurs de z_{min} , la hauteur minimale qui signifie la hauteur au-dessous de laquelle la loi logarithmique qui décrit l'évolution de la vitesse par la hauteur n'est pas valable.

Nature du terrain	k	z_0 [m]	z_{min} [m]
1. Haute mer, lacs offrant au moins 5 km de longueur au vent et régions lisses et plates, sans obstacles	0.17	0.01	2
2. Régions de culture avec haies et avec quelques petites fermes, maisons ou arbres	0.19	0.05	4
3. Zones industrielles ou suburbaines et forêts permanentes	0.22	0.30	8
4. Zones urbaines dont au moins 15% de la surface est occupée par des bâtiments de hauteurs moyenne supérieure à 15 m	0.24	1.00	16

Tableau 1 : Classification de terrains selon les caractéristiques de rugosité, d'après l'Eurocode [Eurocode Partie 2-4; 1995].

La vitesse du vent et son comportement fluctuant affectent :

- d'une part le confort *dynamique* de l'homme : les forces induites par le vent, variables dans le temps et dans l'espace sollicitent mécaniquement le corps humain, entravent ses mouvements, agressent ses vêtements etc [Gandemer et Guyot, 1976].
- d'autre part le confort *thermique* de l'homme [Chapitre I.2.2] : les échanges thermiques entre le corps humain et le milieu extérieur [Gandemer et Guyot, 1976].

Le vent exerce un effet mécanique, une force (F) sur l'individu en position debout qui est décrite par l'équation suivante :

$$F = 1/2 \cdot \rho \cdot \vec{U}^2(t) \cdot A_p \cdot C_D \quad \text{[Équation 8]}$$

où

F est la force exercée par le vent sur l'individu en N;

$\vec{U}^2(t)$ est la vitesse instantanée en m^2/s^2 ;

ρ est la masse volumique de l'air en kg/m^3 ;

A_p est le maître couple de l'individu en m^2 ;

C_D est le coefficient de traînée.

La surface totale du corps humain, notée A_{Du} , est déterminée à partir de la formule de Dubois :

$$A_{Du} = 0.203 \cdot w^{0.425} \cdot h_b^{0.725} \quad \text{[Équation 9]}$$

où

w est le poids de l'individu en kg;

h_b est la hauteur de l'individu en m.

Selon les mesures de Pugh le maître couple de l'individu égal à 31% de la surface Dubois du corps [Balázs et Szalay, 1983] :

$$A_p / A_{Du} = 0.31 \quad \text{[Équation 10]}$$

Le C_D prend sa valeur entre 1.0 et 1.3. Il est fonction de la position de l'individu et varie avec le déplacement de l'individu. La valeur de A_p varie également avec le déplacement de l'individu et par sa position.

De nombreuses études ont été faites sur l'effet mécanique du vent. Hunt [Hunt *et al.*, 1976.] a effectué une série d'essais paramétriques en soufflerie sur 40 personnes. Il a cherché à décrire la gêne mécanique due au vent. Les personnes étaient exposées à des vitesses de vent comprises dans la gamme 4-8.5 m/s et elles réalisaient des tâches habituelles : marche, lecture d'un journal, versement

d'un liquide dans un verre, habillement en imperméable, mettre une cravate etc. En recueillant les réponses subjectives des individus ils ont chiffré leurs sensations ressenties par rapport au confort thermique et à la sécurité de la marche.

L'échelle de Beaufort indique les manifestations du vent en fonction de sa vitesse et des sensations ressenties.

Vitesse du vent en m/s		Caractéristiques du vent
Force	z = 2m	
2	1.5 - 3	Les visages ressentent la sensation du vent. Les feuilles bruissent.
3	3 - 4.5	Les feuilles et les petits rameaux sont en mouvement permanent. Le vent déploie pleinement les drapeaux. Les cheveux sont dérangés. Les vêtements amples battent au vent.
4	4.5 - 7	La poussière et les papiers se soulèvent. Les branches s'agitent. Les cheveux sont décoiffés.
5	7 - 9	Les petits arbres avec des feuilles oscillent. La marche est légèrement perturbée.
6	9 - 11	Les grosses branches se mettent en mouvement. Le vent siffle dans les fils téléphoniques. Les parapluies sont utilisés avec peine. La marche devient très instable.
7	11 - 14	Les arbres sont totalement en mouvement. On éprouve de grosses difficultés à marcher contre le vent.
8	14 - 17	Les branches d'arbres se cassent. D'une façon générale, progression pédestre très difficile et dangereuse.
9*	17-20	Risque d'être violemment projeté à terre sous l'effet des bourrasques.

Tableau 2 : Echelle de Beaufort [Gandemer et Guyot, 1976].

La notion de confort est à dissocier de la notion de sécurité. Le seuil de danger qui correspond à la force qui tend à jeter l'individu par terre est basé sur des considérations mécaniques et aérodynamiques (maître couple, position, poids etc.) et est généralement de l'ordre de 15 m/s [Gandemer et Guyot, 1980].

Penwarden [Penwarden *et al.*, 1973] comme Gandemer distingue les notions de confort et celle de sécurité :

- du point de vue de la sécurité les rafales du vent sont à considérer. Une rafale de 1 à 3 secondes associée à un vent de vitesse moyenne de 12 m/s mesuré sur une heure peut atteindre des vitesses de pointe de 24 m/s qui peuvent entraîner la perte de l'équilibre chez les individus. Les vitesses de l'ordre de 20 m/s peuvent signifier un risque d'accident pour les piétons.
- du point de vue du confort, le seuil maximal est une vitesse moyenne d'environ 5 m/s tandis que 10 m/s de vitesse moyenne représente le seuil maximal de progression pédestre.

Il existe plusieurs thèses concernant **l'évaluation de confort au vent**.

Isyumov [Isyumov, 1978] montre deux méthodes pour définir des critères de confort au vent :

- Selon **la méthode des critères relatifs** les conditions aérodynamiques autour des bâtiments sont acceptables si elles sont identiques à celles d'une zone de "référence" qui est jugée confortable, ou

si elles ne conduisent pas à un confort dégradé ou à de l'inconfort par rapport à la situation initiale sans bâtiment.

- Selon la **méthode des critères absolus** les conditions aérodynamiques autour des bâtiments sont acceptables si la fréquence de dépassement d'un seuil défini n'atteint pas une certaine valeur. Cette dernière varie suivant l'activité pratiquée dans un espace extérieur défini.

L'évaluation du confort à partir des critères absolus est la plus fréquemment employée, cependant il n'existe pas de critère universel, différents auteurs suggèrent différentes valeurs de seuils de confort.

D'après Hunt et al. [Hunt *et al.*, 1976] le vent turbulent peut être décrit par un vent équivalent (\bar{U}_s) qui intègre la vitesse moyenne (\bar{U}) et l'intensité de turbulence (σ_U / \bar{U}) :

$$\bar{U}_s = \bar{U} \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{\sigma_U}{\bar{U}} \right) = \bar{U} + 3 \cdot \sigma_U \quad \text{[Équation 11]}$$

Ils déterminent le seuil du confort à 6 m/s ce qui est plus élevé que celui de Penwarden. Ils suggèrent que pour des températures inférieures à 15°C, la vitesse moyenne soit multipliée par un facteur de refroidissement. Celui-ci indique une intention d'approche thermique de confort au vent.

En ce qui concerne l'aspect de sécurité, Melbourne [Melbourne, 1978] considère que ce sont les vitesses de pointe qui signifient un danger potentiel pour les individus, car elles peuvent causer la perte de l'équilibre chez les piétons :

$$\hat{U}_s = \bar{U} + 3.5 \cdot \sigma_U \quad \text{[Équation 12]}$$

Il recommande d'utiliser les données de vent mesurées pendant une période courte, par exemple pendant 1 minute, pour évaluer la sécurité, tandis que pour l'évaluation du confort thermique il recommande d'employer les données mesurées pendant une période plus longue, par exemple pendant une heure [Melbourne 2005, comm. pers.]. Ceci indique que la vitesse d'un vent équivalent est à calculer avec un facteur multiplicateur de l'écart type (σ) proche de 1 pour l'analyse du confort et avec un facteur de valeur plus élevée (exemple : 3 ou 3.5) pour l'analyse de la sécurité.

Les seuils de sécurité et de confort sont également à respecter dans certains types d'espaces extérieurs ou semi extérieurs en particulier dans des espaces où le séjour peut être relativement long : parc, terrasse de cafés et de restaurants, halls de gares, théâtres de plein air, stades etc.

L'activité de l'individu rend la notion de confort relative, la perception n'est pas la même si l'on subit en se déplaçant ou en étant assis sur une tribune d'un stade. Le Tableau 3 illustre les fréquences d'inconfort pour toutes directions de vent confondues qui sont admises suivant les activités [Gandemer et Guyot, 1976].

Activités	Limite supérieure de la gêne pour un confort convenable (en pourcentage du temps annuel)
Station immobile prolongée <i>terrasse de café, théâtre en plein air, piscine etc.</i>	5
Station immobile courte <i>jardin public, aires de jeux, rue commerçante, galerie etc.</i>	10
Marche normale <i>promenade pédestre, passage piétonnier, entrée d'immeuble etc.</i>	15
Marche rapide <i>Parking, trottoir des avenues etc.</i>	25

Tableau 3 : Fréquence cumulable d'inconfort acceptable en fonction des activités I. [Gandemer et Guyot, 1976]

Pour ces fréquences d'inconfort Gandemer [Gandemer et Guyot, 1976] a défini un seuil d'inconfort de 5 m/s de vitesse moyenne et un écart type est égal à 20% de la vitesse moyenne. Cet écart type correspond à une rugosité du sol de type rase campagne. Le seuil de confort en général à respecter s'écrit de la façon suivante :

$$\bar{U} + \sigma \leq 6m/s \quad \text{[Équation 13]}$$

Delpech et al. [Delpech *et al.*, 2005] comparent des méthodes d'évaluation du confort de cinq laboratoires et démontrent par une étude de cas que les critères de confort varient significativement selon le laboratoire. Ils trouvent que les critères utilisés au CSTB sont les plus restrictifs et ceux de l'Université de Concordia à Montréal sont les moins restrictifs. Leur conclusion indique que les critères de confort sont influencés par le climat du pays, en conséquence par l'acclimatation des habitants. Ceci signifie que les critères sont plus restrictifs dans un pays au climat relativement modéré et moins restrictifs dans un pays au climat froid.

2.1.2 Confort au vent dans les stades

Les caractéristiques de l'écoulement dans les stades présentent un sujet d'intérêt de plusieurs points de vue, en particulier :

- La ventilation de la pelouse;
- L'homologation des résultats des compétitions d'athlétisme;
- Déroulement des jeux de balle – trajectoire de balle;
- Confort au vent des spectateurs.

Le présent travail se focalise sur le confort aérothermique des spectateurs y compris l'effet mécanique et thermique de l'écoulement, et présente une extension au confort visuel et acoustique. Quant au vent il ne s'agit pas d'une analyse de la sécurité, mais d'une analyse du confort et de l'inconfort.

En ce qui concerne le confort au vent des spectateurs, il est nécessaire de tenir compte de leur station immobile prolongée. Ceci justifie le besoin d'un critère plus restrictif par rapport aux situations où le temps d'exposition des individus est moins important ou lorsqu'ils ont la possibilité de se déplacer, exemple : promeneurs d'un jardin public ou d'une rue commerçante.

Un seuil plus exigeant a été défini au CSTB Nantes basé sur l'échelle de Beaufort. La force 2 de l'échelle Beaufort qui signifie une vitesse du vent de 1.5 m/s à 3 m/s correspond au bruissement des feuilles et à la perception de la sensation de vent par le visage. La force 3 marquant une vitesse de 3 à 4.5 m/s correspond au mouvement des feuilles et des rameaux, au déploiement complet des drapeaux, aux battements des vêtements amples et aux mouvements légers des cheveux. D'après des observations sur la perception humaine, une valeur conventionnelle de 3 m/s pour la vitesse moyenne associée à une fluctuation de 0.6 m/s, qui équivaut à 20% de la vitesse moyenne, correspond à la limite de confort pour une station assise prolongée [Dufresne de Virel, 1995(1)]. Le taux de fluctuation est égale à celui de la rase campagne. La caractérisation quantitative de la gêne mécanique due au vent s'écrit :

$$\bar{U} + \sigma > 3.6 \text{ m/s} \quad \text{situation d'inconfort} \quad \text{[Équation 14]}$$

$$\bar{U} + \sigma \leq 3.6 \text{ m/s} \quad \text{situation de confort} \quad \text{[Équation 15]}$$

La vitesse moyenne et son écart type ont été mesurée par anémométrie à fil chaud en de nombreux points des maquettes des stades à l'échelle de 1:100 à 1:200. Selon la méthodologie appliquée du CSTB, la maquette du stade est étudiée en soufflerie pour les incidences du vent qui apparaissent les plus fréquemment sur un site défini.

La vitesse à la station météorologique et la vitesse de référence du vent sur le site sont liées par une loi logarithmique qui intègre la rugosité du site [Chapitre I. - 2.1.1.]. Le point de référence se trouve en amont du stade en zone dégagée. Les fréquences de dépassement du seuil sont déterminées sur la base des mesures menées en soufflerie. Les différentes parties de tribunes sont qualifiées à partir de la fréquence de dépassement du seuil. La Figure 31 représente la fréquence de dépassement du seuil de 3.6 m/s (en % du temps) sous la forme de cartes d'isovaleurs pour trois incidences du vent étudiées.

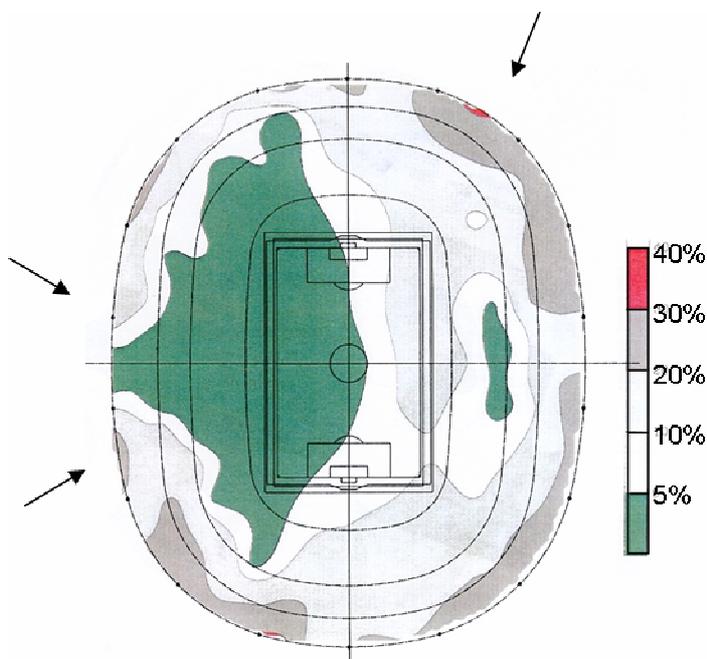


Figure 31 : Fréquence de dépassement du seuil de 3.6 m/s pour le Stade de France pour les trois incidences du vent indiquées [Dufresne de Virel, 1995(3)].

Une fréquence annuelle de dépassement du seuil de 3.6 m/s toutes incidences de vent confondues, d'environ 5% du temps est considérée comme admissible au niveau des tribunes. "Pour l'aire de jeu, sous réserve d'une bonne homogénéité des vitesses de vent, des fréquences annuelles de gêne jusqu'à 15% sont satisfaisante" [Dufresne de Virel, 1995(1)].

L'étude du Stade de Gerland à Lyon [Dufresne de Virel, 1995(2)] porte sur l'effet induit par le remplacement des extrémités (parties courtes des tribunes qui se trouvent derrière le but) par des tribunes plus hautes et plus poreuses disposées en deux niveaux. Les quatre angles des tribunes sont ouverts.

L'espace entre les niveaux des nouvelles tribunes implique des accélérations au niveau de la partie haute des tribunes latérales. On observe également des vitesses élevées au niveau des parties hautes des extrémités. L'insertion d'écrans brise vents de 1.5 mètre haut, pleins sur les bords latéraux des tribunes hautes et poreux à l'arrière des tribunes basses diminuent significativement la gêne liée au vent au niveau des tribunes (Figures 32 et 33).

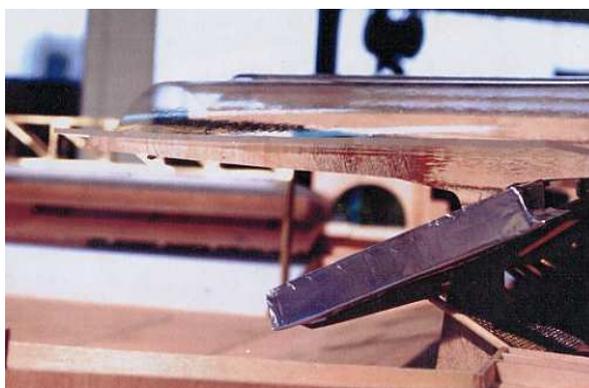


Figure 32 : Ecrans brise-vent sur les bords latéraux des tribunes [Dufresne de Virel, 1995(2)]

Figure 33 : Ecrans brise-vent sur le talus [Dufresne de Virel, 1995(2)]

Pour cette étude le critère de confort a été défini pour une durée annuelle de dépassement du seuil de 3.6 m/s de 6% du temps. Une démarche identique a été suivie dans les essais menés sur le Stade de France à Saint Denis. Ces essais démontrent que cette configuration du stade possède globalement une bonne protection vis-à-vis du vent. L'écoulement au niveau de l'aire de jeu est homogène. Les zones d'inconfort peu étendues se situent en haut des tribunes sous le vent dans l'axe du vent et sont dues à la libre circulation du flux entre la toiture et le haut des gradins. Ces zones de moindre confort peuvent être réduites par l'ajout d'un écran brise-vent [Dufresne de Virel, 1995(3)].



Figure 34 : Ecrans brise vents pleins sur le pourtour de la tribune [Dufresne de Virel, 1995(1)]

Les spectateurs du Stade de la Beaujoire à Nantes ont signalé l'existence d'une gêne liée au vent. Le confort a été évalué d'une façon identique à ce qui a été fait dans les exemples précédents. L'axe longitudinal du stade est orienté nord-sud, cependant les vents dominants sont de direction quasi diagonale (parallèles aux diagonales de l'aire de jeu). Les essais menés en soufflerie du CSTB Nantes sur une maquette du stade (Figure 34) ont mis en évidence la nécessité d'augmenter la protection des spectateurs contre le vent.

Suite aux essais en soufflerie du CSTB Nantes, les modifications suivantes ont été proposées :

- Ajout d'écrans poreux sur les vomitoires est et ouest;
- Ajout de portes pleines dans les couloirs des accès des tribunes nord et sud;
- Ajout d'écrans poreux dans l'espace inter niveaux de la tribune ouest;
- Ajout d'écrans pleins sur les pourtours nord et sud ainsi que dans les brèches sud-ouest et nord-ouest.

Les traitements par écrans pleins non seulement protègent les tribunes du vent, mais encore limitent la quantité de pluie reçue par la tribune sud [Dufresne de Virel, 1995(3)].

Des critères plus restrictifs ont été appliqués au Stade Ataturk à Istanbul [Moreau, 2002(1)] qui exigent qu'une valeur inférieure à 5%, au mieux "quelques pourcents" de fréquence annuelle d'occurrence de l'inconfort soit acceptable. De plus comme l'illustre le Tableau 4, les valeurs maximales de fréquence annuelle d'occurrence de l'inconfort sont également réduites d'environ 5% pour les autres activités par rapport aux exigences définies par Gandemer [Gandemer et Guyot, 1981]. Les valeurs des fréquences acceptables d'inconfort varient d'une part avec l'évolution des exigences vers le confort au vent et d'autre avec le climat du site donné.

Activités	Limite supérieure de la gêne pour un confort convenable (en pourcentage du temps annuel- <i>Pi</i>)
Station immobile prolongée <i>terrasse de café, théâtre en plein air, piscine etc.</i>	quelques pourcents <5
Station immobile courte <i>jardin public, aires de jeux, rue commerçante, galerie etc.</i>	5
Marche lente <i>promenade pédestre, passage piétonnier, entrée d'immeuble etc.</i>	10
Marche rapide <i>Parking, trottoir des avenues etc.</i>	20

Tableau 4 : Fréquence cumulée d'inconfort acceptable en fonction des activités II. [Gandemer et Guyot, 1981]

Le **Stade Ataturk** comporte deux niveaux de tribunes :

- le premier est continu et est encaissé dans le sol,
- le deuxième forme les tribunes latérales.

Les extrémités du stade sont ouvertes. Les vents dominants sont parallèles à l'axe longitudinal du stade, en conséquence ils impliquent une ventilation forte au niveau des tribunes.

Ainsi **les degrés suivants de confort et de l'inconfort ont été différenciés** basés sur la fréquence de dépassement du seuil de 3.6 m/s, *Pi* (en % du temps):

0% < *Pi* < **5%** **protection excellente contre le vent;**
5% < *Pi* < **10%** **protection convenable contre le vent;**

10%	<	<i>Pi</i>	<	15%	protection modérée;
15%	<	<i>Pi</i>	<	20%	assez inconfortable;
20%	≤	<i>Pi</i>			très inconfortable.

En comparant les valeurs de limite supérieure de la gêne du tableau avec les valeurs du seuil de différents degré de confort et d'inconfort, il semble qu'**un pourcentage de temps acceptable pour la marche rapide soit qualifié comme très inconfortable pour les spectateurs d'un stade en station immobile prolongée.**

Les essais menés sur la maquette du Stade Atatürk ont montré que l'exposition au vent de l'intégralité des tribunes est très sévère. Un traitement aérodynamique a été proposé afin de réduire l'intensité de ventilation au sein du stade :

- deux écrans poreux (à 50 % de porosité) de hauteur 20 et 30 mètres tendus à la périphérie nord du stade afin de remplir la discontinuité entre les tribunes est et ouest ;
- un écran brise vent de 3 mètres de hauteur situé à l'extrémité nord;
- des écrans brise-vent locaux transparents (exemple : Plexiglas) de porosité 25% et de hauteur de 3 mètres au niveau des tribunes ouest en position radiale, éloignés de 15-20 mètres l'un de l'autre;
- écrans en partie pleins et poreux au niveau des vomitoires.

Ce traitement a amélioré le confort au vent au niveau de l'intégralité des tribunes [Moreau, 2002(1)].

Le confort au vent dans le Stade Delaune à Reims a été également évalué sur la base des critères appliqués au Stade Atatürk. Le stade comporte des ouvertures aux angles, en conséquence son design original présentait des zones singulières très exposées au vent [Moreau, 2002(2)]. Un traitement aérodynamique a été mis en place : il consiste à proposer de protéger d'une part les angles par les écrans brise-vent et d'autre part les sièges localisés aux environs immédiats des vomitoires. Il était proposé que la brèche horizontale entre la partie basse et haute des tribunes dans les angles soit fermée par un écran brise-vent de porosité mixte : jusqu'à 3 mètres de hauteur l'écran est opaque et à partir de 3 mètres jusqu'à la tribune haute il est de porosité à 20%. Ainsi les plateformes accueillant les personnes à mobilité réduite sont protégées et la gêne au niveau des tribunes basses de part et d'autre de l'ouverture dans l'angle est réduite. Par ce traitement la protection des tribunes contre le vent a été augmentée : plus de 60% des tribunes ont une protection excellente. La Figure 35 illustre la fréquence de dépassement du seuil de 3.6 m/s pour le stade sans protection. Les zones bleue et verte signifient une ambiance confortable, tandis que les zones jaune, orange et rouge marquent une ambiance inconfortable. La Figure 36 illustre l'augmentation de l'aire des zones confortables due à l'insertion des écrans brise-vent.

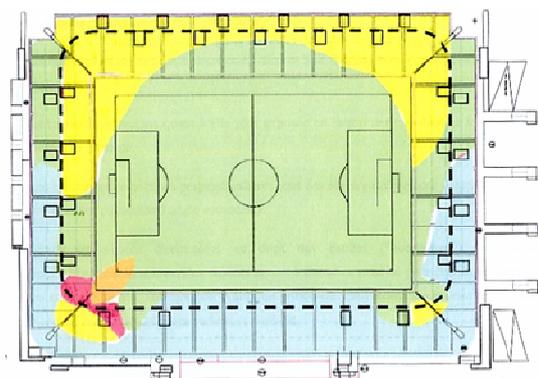


Figure 35 : Fréquence de dépassement du seuil de 3.6 m/s pour le Stade Delaune à Reims pour toutes les incidences confondues – stade sans écrans brise-vent [Moreau, 2002(2)].

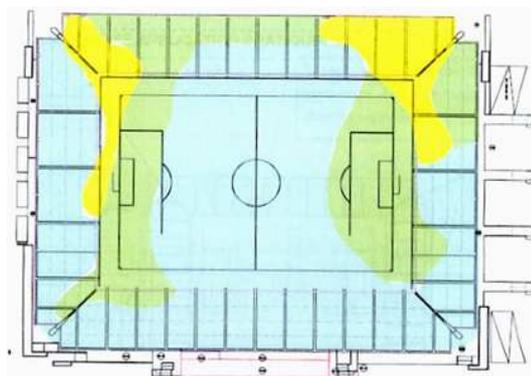


Figure 36 : Fréquence de dépassement du seuil de 3.6 m/s pour le Stade Delaune à Reims pour toutes les incidences confondues – stade avec des écrans brise-vent [Moreau, 2002(2)].

Les exemples cités ci-dessus montrent une évolution des critères du confort au vent appliqués au sein du CSTB Nantes. Les études menées par Delpech [Delpech *et al.*, 2005] illustrent la variation des critères dans les différents laboratoires qui traitent de ce problème.

Les différences concernant la durée de l'inconfort et la vitesse du seuil peuvent être dues à plusieurs raisons :

- Il est possible qu'une configuration moins protectrice contre le vent sur un site moins venté soit jugée "bonne". Cependant il est également possible qu'une configuration de capacité protectrice élevée sur un site très venté ne corresponde pas aux critères de confort au vent. Ceci suggère la nécessité d'évaluation de confort au vent à partir de la méthode des critères relatifs, selon lesquels les conditions aérodynamiques sont acceptables si elles ne conduisent pas à un confort dégradé ou à de l'inconfort par rapport à la situation initiale – sans bâtiment [Isyumov, 1978].
- En raison de l'évolution des mode de vie les attentes liées au confort deviennent plus exigeantes.
- Les conditions climatiques du site influencent les attentes des individus par rapport à l'ambiance aéraulique. Les attentes dépendent de l'adaptation physiologique et psychologique de l'individu. Chaque personne perçoit différemment son environnement en fonction de son comportement et des informations qu'il a en une situation donnée [Bouyer, 2004]. Plusieurs dimensions peuvent influencer son jugement. Parmi ces dimensions la plus importante est l'expérience. L'expérience se réfère au passé thermique de l'individu en particulier à long terme.

Ainsi, du point de vue du site et aussi de l'individu l'ajustement de la durée maximale de l'inconfort et également celui du seuil de vitesse peut être nécessaire.

Les études citées ci-dessus portent sur l'effet mécanique du vent, notamment sur le confort au vent jugé sur la base d'un seuil défini pour les incidences des vents dominants sur les sites donnés. Elles identifient les différentes zones d'anomalie et permettent de développer des traitements locaux et aussi d'étudier l'effet et l'efficacité de ces traitements.

Outre l'effet mécanique le vent modifie également le confort thermique des individus.

2.2 CONFORT THERMIQUE

2.2.1 Approche générale du confort thermique

2.2.1.1 Facteurs influençant le confort thermique

La notion de confort thermique est liée à la sensation de bien-être de l'individu. On trouve plusieurs approches du confort thermique dans la littérature.

D'après la définition d'ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Airconditioning Engineers) le confort thermique est atteint lorsque l'individu exprime une satisfaction au sujet de son environnement.

Selon Depecker [Depecker *et al.*, 1989] une ambiance confortable est "une ambiance pour laquelle l'organisme humain peut maintenir constante sa température corporelle sans mettre en jeu de manière perceptible, et donc désagréable ses mécanismes instinctifs thermorégulateurs de lutte contre le chaud et le froid".

Le confort thermique de l'être humain correspond à une motivation simple mais permanente qui le pousse à chercher, voire créer, certaines situations climatiques, à en maintenir certaines d'entre elles et à les juger en terme d'agrément ou de désagrément [Galeou *et al.*, 1989].

Souvent le confort est associé à l'absence d'inconfort. Cependant, il existe des auteurs qui dissocient l'état de confort de l'état de neutralité : l'alternance des stimuli qui se compensent peut également impliquer un état de confort.

Il n'existe pas de définition universelle du confort thermique, en d'autres termes la sensation de confort thermique reste une notion personnalisée, dans la mesure où les individus sont différents [Depecker *et al.*, 1989].

La sensation thermique peut être liée au changement de température corporelle de l'individu dû aux échanges thermiques entre l'individu et son environnement. De nombreux facteurs affectent les flux de chaleur depuis le corps, et par conséquent le confort thermique. Ces facteurs peuvent être regroupés en trois catégories [Auliciems et Szokolay, 1997] :

Facteurs climatiques	température d'air, rayonnement, humidité relative, mouvement d'air;
Facteurs personnels	métabolisme, habillement;
Facteurs contributeurs	alimentation, boisson, acclimatation, forme corporelle, gras sous-cutané, âge, sexe.

Tableau 5 : Facteurs influençant le confort thermique [Auliciems et Szokolay, 1997]

Le présent travail se focalise sur l'effet des paramètres climatiques, notamment l'effet du vent sur le confort aérothermique des spectateurs dans les stades. Néanmoins il est nécessaire d'étudier également les autres paramètres car c'est leur interaction qui modifie le ressenti des individus.

Température de Bulbe Sec (Dry Bulb Temperature, DBT)

L'échange convectif entre l'individu et son environnement dépend de la différence entre la température de la surface du corps de l'individu en puissance quatre et divisée par 100 et la température de l'air ambiant. Une différence plus importante implique un échange plus intense. En général la température de l'air ambiant est inférieure à celle de la surface du corps. En conséquence le flux de chaleur passe depuis le corps vers l'environnement. Dans le cas où la température de la surface du corps est égale à celle de l'air ambiant, il n'y a pas d'échange convectif entre l'individu et l'air ambiant. Si la température de l'air ambiant est plus importante que celle de la surface du corps, la direction de l'échange convectif est inversée : c'est le corps qui a un gain thermique depuis l'environnement.

Outre la température de l'air, c'est le rayonnement qui détermine dans une plus large mesure la sensation thermique de l'individu.

Température de Bulbe Humide (Wet Bulb Temperature, WBT)

La Température de Bulbe Sec et la Température de Bulbe Humide caractérisent le taux d'humidité de l'air. Ce dernier est décrit également par d'autres paramètres, comme l'humidité relative ou la pression partielle de vapeur de l'eau dans l'air. Néanmoins ces paramètres sont informatifs uniquement lorsqu'ils sont analysés avec les données de la température de Bulbe Sec. Le taux d'humidité de l'air affecte principalement les échanges évaporatoires entre l'individu et son environnement.

Une pression partielle de vapeur d'eau peut être donnée à la couche d'air qui se situe à proximité directe de la surface du corps. La valeur de cette pression partielle de vapeur d'eau est égale à la pression de saturation à la température de la surface du corps. Plus la différence entre la pression partielle de vapeur d'eau au niveau de la surface immédiate du corps (couche limite) et la pression partielle de l'air ambiant est importante, plus l'échange thermique et évaporatoire entre l'individu et son environnement est important. Dans l'air ambiant sec cet échange est encore plus important.

L'impact de l'humidité de l'air est plus important dans les conditions où les températures sont élevées car l'évaporation représente le moyen le plus efficace de perte de chaleur au-delà d'une certaine limite proche de 37 °C.

L'humidité relative en elle-même a peu d'effet sur le confort lorsque l'ambiance est proche des gammes de températures confortables. Son effet est manifeste lorsque les températures sortent des zones de confort.

Température Radiante Moyenne (Mean Radiant Temperature, MRT)

L'intensité de l'échange thermique par rayonnement de grande longueur d'onde entre les surfaces environnantes et l'individu est déterminée par la différence entre la températures des surfaces environnantes en puissance quatre, mesurée sur l'échelle absolue, et la température de la surface du

corps de l'individu en puissance quatre, mesurée sur l'échelle absolue, et pondérée par les facteurs de forme relatifs et également par les coefficients d'absorption et d'émission des surfaces.

Selon Arens et al. [Arens *et al.*, 1986] le 72 % de la surface Du Bois du corps est exposée au rayonnement de grande longueur d'onde.

L'échange par rayonnement entre des surfaces terrestres (exemple : sol, surfaces urbaines etc.) se passe par des ondes électromagnétiques de grande longueur d'ondes.

L'effet de la différence entre la Température Radiante Moyenne et la température ambiante peut être par le Champs Effectif du Rayonnement (Effective Radiant Field, ERF) [Chapitre I.2.2.1.5].

Rayonnement solaire

L'échange thermique par rayonnement de courte longueur d'ondes se développe quand l'individu est exposé au rayonnement solaire direct. L'effet du rayonnement est caractérisé par son éclairement en W/m^2 dont une partie est absorbée par la peau. Ce rayonnement peut être de deux sortes : diffus et direct. D'après Arens et al. [Arens *et al.*, 1986] le 72 % de la surface Du Bois du corps est exposée au rayonnement diffus et direct.

La surface intégrale du corps est concernée par le rayonnement diffus, tandis que le rayonnement direct concerne uniquement la surface projetée du corps sur un plan perpendiculaire du rayonnement.

L'effet du rayonnement solaire peut être exprimé par le Champs Effectif du Rayonnement (Effective Radiant Field, ERF) [Chapitre I.2.2.1.5]. Le ERF relie ainsi le MRT et le rayonnement de courte longueur d'onde.

Le mouvement de l'air

Le mouvement de l'air affecte les échanges évaporatoires et convectifs. Les échanges évaporatoires sont proportionnels au coefficient d'évaporation et les échanges convectifs sont proportionnels au coefficient de convection. Ces coefficients sont des fonctions monotones de la vitesse de l'écoulement : une vitesse plus importante implique la croissance de ces coefficients [Allard, 1998].

Le mouvement de l'air induit des effets thermiques sans aucune modification de la température de l'air :

- **Il accroît la perte de chaleur par convection tant que la température de l'écoulement reste inférieure à celle de la peau.** Dans certains climats la température de l'air peut atteindre plus de 40°C, ce qui implique un réchauffement de la peau
- **Il accélère la perte de chaleur par évaporation.** Dans des conditions où le taux d'humidité relative est bas –inférieur à 30%– cet effet est important car l'évaporation est limitée même en air calme. Dans des conditions très humides, où le taux d'humidité relative dépasse 85% la perte de chaleur par évaporation est restreinte, en conséquence la perte évaporatoire due au

mouvement de l'air ne peut pas significativement refroidir l'individu [Auliciems et Szokolay,1997].

Outre la vitesse de l'air c'est la turbulence qui modifie significativement les échanges convectifs et évaporatoires entre l'individu et son environnement, et mérite d'être étudiée séparément.

2.2.1.2 L'effet de la turbulence sur le confort thermique

De nombreuses études s'articulent autour de l'effet de la turbulence sur le confort thermique, néanmoins ce champ n'est pas complètement exploré. Des résultats de ces études indiquent que la turbulence est un facteur qui ne peut pas être négligé car elle intervient dans les échanges convectifs et évaporatoires qui se passent entre l'individu et son environnement.

Les résultats d'expériences conduites par Mayer [Mayer, 1993] montrent que la turbulence modifie le coefficient de convection: pour des couples de vitesses et de turbulences au-dessous de 40% d'intensité de turbulence, c'est la vitesse moyenne qui détermine la valeur du coefficient de convection, tandis qu'au-delà de 40% c'est la fluctuation de la vitesse.

Des expériences menées par Moreau au CSTB Nantes [Moreau, 1999] sur une peau artificielle montrent que dans le cas d'un écoulement fluctuant (gamme 0.2-0.4 Hz), les phénomènes thermiques observés correspondent à ce que l'on obtient en régime régulier pour une vitesse moyenne équivalente aux pointes maximales du régime fluctuant. Alors, les mécanismes d'échanges évaporatoire et convectif dans le cas de l'écoulement fluctuant sont conditionnés par les valeurs de pointe.

Dans les cas de vitesses faibles, sous le seuil de la sensibilité des thermorécepteurs la turbulence peut augmenter les stimuli et leur permettre d'être perçus par les thermorécepteurs cutanés [Moreau, 1999].

Les thermorécepteurs cutanés sont sensibles non seulement à la variation de température de peau, mais aussi à la rapidité de cette variation. Moreau *et al.* [Moreau *et al.*, 2001] mettent en évidence qu'au-delà de 1 Hz les thermorécepteurs ne peuvent globalement plus percevoir les fluctuations du signal (du vent).

Deval *et al.* ont observé que toute situation confortable devient une situation d'indifférence puis d'inconfort si elle est maintenue un certain temps. Il se produit un phénomène de saturation des thermorécepteurs sensibles. Cette "saturation" peut être éliminée par de légers gradients spatio-temporels. Un écoulement turbulent est favorable par rapport à un écoulement régulier, car une

certaine dynamique de l'ambiance est nécessaire pour maintenir le confort aérothermique [Deval *et al.* 1983].

Les vitesses moyennes faibles, en dessous de 0.25 m/s [Aynsley, 1974], sans turbulence sont imperceptibles car elles sont en dessous du seuil de sensibilité. Quand la turbulence est associée à ces vitesses moyennes faibles, elles deviennent perceptibles pour les thermorécepteurs. Alors, l'effet de la turbulence est favorable du point de vue physiologique parce qu'elle stimule les thermorécepteurs d'une façon dynamique.

Ces travaux mettent en évidence que non seulement la vitesse moyenne, mais aussi sa composante fluctuante affecte le ressenti des individus par rapport à l'ambiance thermique, ou plus précisément : à l'ambiance aérothermique. **Le groupement Ψ** développé par Gandemer [Gandemer et Guyot, 1976] permet de caractériser le niveau de confort dans un point choisi (i), à proximité d'une construction ou dans un bâtiment (exemple au niveau des tribunes d'un stade) par rapport à un point de référence. Ce groupement **intègre la vitesse moyenne et son écart type d'un point choisi et ceux d'un point de référence**. L'écart type de la vitesse, plus précisément la fluctuation de la vitesse autour de sa valeur moyenne décrit la turbulence.

$$\Psi = \frac{\overline{U}_i + \sigma_i}{\overline{U}_{ref} + \sigma_{ref}} \quad \text{[Équation 16]}$$

où

- \overline{U}_i est la vitesse moyenne d'un point i ;
- σ_i est l'écart type de la vitesse moyenne d'un point i ;
- \overline{U}_{ref} est la vitesse moyenne du point de référence;
- σ_{ref} est l'écart type de la vitesse moyenne du point de référence.

Le groupement Ψ sera employé pour décrire les conditions de l'écoulement au niveau des tribunes dans les différentes configurations du stade [Chapitre II.4.].

2.2.1.3 Le bilan thermique du corps humain

Le corps humain produit sans interruption de la chaleur métabolique (M) de deux sortes :

- **métabolisme basal** dû aux procédés biologiques continus et non conscients;
- **métabolisme musculaire**, dû aux processus contrôlables, à l'exception du frissonnement [Auliciems et Szokolay, 1997].

L'énergie produite sous forme de chaleur est transférée vers la périphérie du corps par conduction à travers les tissus biologiques et par convection sanguine. Il est nécessaire de dissiper cette chaleur à

l'environnement depuis le corps afin d'éviter le changement de température corporelle. Un individu au repos en position assise produit environ 58 W/m^2 ; 58.2 W/m^2 correspond à l'unité de métabolisme, 1 MET. Cette unité a été mise au point afin de déterminer l'énergie dépensée selon le type d'activité exercée par l'individu. Le Tableau 6 illustre la production de l'énergie métabolique selon l'activité [AFNOR 7730, 1995].

Activité	Production d'énergie métabolique	
	W/m ²	Met
Repos, couché	46	0.8
Repos, assis	58	1.0
Activité légère, assis (bureau, école etc.)	70	1.2
Activité légère, debout (achats, industrie légère etc.)	93	1.6
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager etc.)	116	2.0
Marche à plat :		
2 km/h	110	1.9
3 km/h	140	2.4
4 km/h	165	2.8
5 km/h	200	3.4
Activité lourde	437	7.5
Montée d'escaliers	1280	22

Tableau 6 : Production de l'énergie métabolique pour différents types d'activité selon la Norme Internationale ISO 7730 [AFNOR 7730, 1995]

La température du noyau central du corps est proche de 37°C, tandis que celle de la peau varie entre 31°C et 34°C dans des conditions de confort. La température de la peau varie au cours du temps et des différences apparaissent entre les températures de différentes parties du corps en fonction de l'habillement et de la circulation sanguine. Le Figure 37 illustre le noyau central et "l'enveloppe" du corps dans un environnement froid et chaud. L'enveloppe du corps qui comprend la peau se situe autour du noyau central du corps. L'enveloppe du corps est plus épaisse dans une ambiance froide en créant une couche isolante importante (image de gauche), tandis que dans une ambiance chaude (image de droite) elle est moins importante [Kent *et al.*, 2001].

La chaleur produite dans le noyau central est transportée dans le corps par convection et conduction vers la peau d'où elle est dissipée par évaporation, rayonnement, conduction et convection.

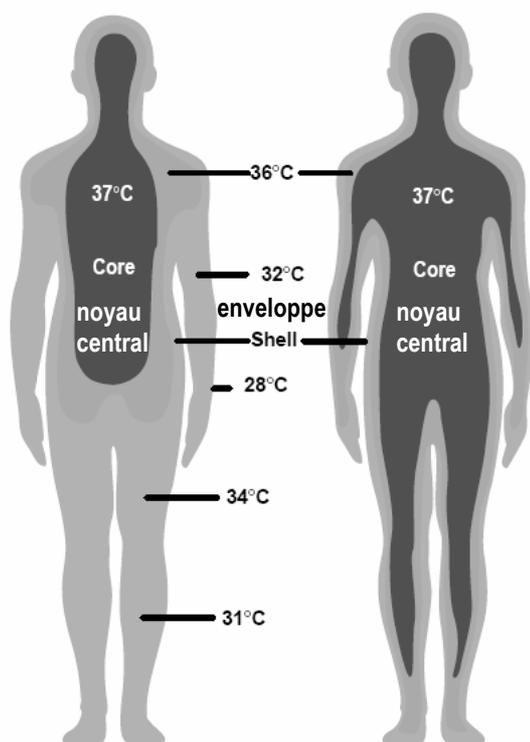


Figure 37: Distribution de la température dans le corps humain et division du corps en un noyau central et une enveloppe [Kent *et al.*, 2001].

La chaleur produite par le corps est perdue soit sous forme de **chaleur sensible**, soit sous forme de chaleur latente. Il existe quatre différents types de transfert de **chaleur sensible** [Kent *et al.*, 2001] :

- **Perte de chaleur par rayonnement vers les surfaces froides** (ou gain de chaleur depuis des surfaces chaudes) (ϕ_{GLO} ; ϕ_{CLO})

Les échanges par rayonnement se produisent entre deux corps à différentes températures. Ces corps n'ont pas besoin d'être en contact l'un avec l'autre. Chacun d'eux absorbe une fraction de l'énergie émise par l'autre par rayonnement en fonction de leurs températures, de la distance qui les sépare, de l'angle de vue respectif et de leurs caractéristiques radiatives. On a l'habitude de dissocier le rayonnement thermique en deux plages de longueur d'onde :

- Rayonnement de courte longueur d'onde qui correspond à l'énergie solaire, $\lambda \leq 2.5\mu\text{m}$;
- Rayonnement de grande longueur d'onde qui provient de l'énergie absorbée et réémise par l'atmosphère et celle provenant des surfaces environnantes, $\lambda > 2.5\mu\text{m}$.

La peau quelle que soit la couleur, est un "corps gris" du point de vue thermique : elle absorbe environ 90% des rayonnements émis par des sources de température inférieure à 100°C [Bouyer,2004].

- **Perte de chaleur par convection** (ou gain si l'air ambiant est plus chaud que la peau) lorsque l'air froid est au contact de la peau qui est plus chaude (ϕ_{CONV});

Les échanges convectifs correspondent à l'échange d'énergie entre le corps humain et un fluide en mouvement (par exemple : l'air ou l'eau). Ces échanges sont d'autant plus importants que la ventilation est intensive et que la température du milieu ambiant est différente que celle de la peau. Les échanges convectifs diminuent par l'interposition d'une couche isolante (qui va limiter l'écart entre la température de la peau et celle de la couche interposée) comme les vêtements. Il existe deux sortes de convection :

- Convection naturelle : le mouvement de l'air est lié à son réchauffement à proximité du corps. Les vitesses maximales dans les couches limites se développent le long du corps et sont de l'ordre de 0.1 à 0.2 m/s ;
- Convection forcée : l'air est en mouvement sous l'action d'une force externe (exemple : ventilateur, vent etc.).

- **Perte de chaleur par conduction** (ou gain si la surface du corps solide avec laquelle le corps est en contact a une température plus élevée que celle de la peau) (ϕ_{COND});

Les échanges conductifs se produisent lorsque le corps humain est en contact avec un corps solide. Le transfert d'énergie se passe au niveau des surfaces de contact des corps.

- **Perte de chaleur par respiration sèche** lorsque l'air froid inspiré est réchauffé dans les poumons puis expiré (ϕ_{RES}).

Il existe trois différents mécanismes de transfert de **chaleur latente** :

- **Perte de chaleur par respiration latente** lorsque l'air inspiré est humidifié dans les poumons (E_{RES}). En conséquence l'air expiré est plus humide que l'air inspiré.

Les échanges par respiration (sèche et latente) sont fonctions des différences de température et du taux d'humidité de l'air ambiant et de l'air expiré par l'individu. Ce dernier est pratiquement saturé en humidité. Les pertes apparaissent sous deux formes : pertes par chaleur sensible dues au réchauffement de l'air inspiré et pertes par chaleur latente dues à l'humidification de celui-ci [Vinet, 2000].

- **Perte de chaleur par diffusion d'humidité à travers la peau** (E_{DIF}).

Ce mécanisme est appelé perspiration. Il est permanent et imperceptible et ne dépend que de l'écart de pression de vapeur d'eau au niveau des pores de la peau, à saturation et à la température de la peau ainsi que de l'air ambiant.

○ **Perte de chaleur par sudation** (E_{SUD}).

La sudation est un phénomène de transfert de masse de la vapeur d'eau depuis la surface du corps vers l'air ambiant. La sueur est évaporée à condition que l'air ambiant soit renouvelé et non saturé en vapeur d'eau. La perte thermique par sudation est également fonction du taux d'humidité de l'air ambiant.

Ainsi, le bilan thermique du corps humain s'écrit :

$$S = M + \varphi_{CLO} + \varphi_{GLO} + \varphi_{CONV} + \varphi_{COND} + \varphi_{RES} + E_{SUD} + E_{DIF} + E_{RES} \quad \text{[Équation 17]}$$

où

S	est la chaleur stockée dans l'organisme;
M	est la production de chaleur interne (métabolisme),
φ_{CLO}	est l'échange par rayonnement de court longueur d'onde;
φ_{GLO}	est l'échange par rayonnement de grande longueur d'onde;
φ_{CONV}	est l'échange par convection;
φ_{COND}	est l'échange par conduction;
φ_{RES}	est l'échange par respiration sèche;
E_{SUD}	est l'échange par évaporation de la sueur;
E_{DIF}	est l'échange par perspiration sensible (diffusion de la vapeur d'eau);
E_{RES}	est l'échange par évaporation respiratoire.

2.2.1.4 Les indices et chartes de confort thermique

L'état thermique de l'individu peut être décrit par les indices et cartes de confort thermique.

Les indices de confort thermique ont pour but de décrire l'effet de la combinaison des différents paramètres climatiques sur la perception des conditions d'une ambiance. Les indices empiriques caractérisent l'ambiance réelle par rapport à une "ambiance équivalente" dont on fait varier les paramètres physiques [Moreau, 1999], tandis que les indices analytiques sont basés sur la mesure des paramètres physiologiques, comme la température de la peau, le taux de sudation etc. [Auliciems et Szokolay, 1997].

Le Tableau 7 résume une compilation de ces différents indices. Les indices dont le nom est marqué en gras considèrent soit des mouvements de l'air supérieurs à 1 m/s, soit des températures comprises dans une gamme plus étendue que celle rencontrée en espace intérieur, soit du rayonnement de courte

longueur d'onde. Ces indices sont donc applicables pour évaluer le confort en espaces extérieurs et semi extérieurs.

Indice ou charte de confort, nom associé, source	Description	Limitation – champ d'application
<p>PMV – PPD</p> <p><i>Predicted Mean Vote</i> <i>Predicted Percentage Dissatisfied</i></p> <p>F a n g e r [Fanger 1970]</p>	<p>Il introduit une échelle basée sur le vote d'un groupe de personnes dans une situation donnée. Il réalise un bilan thermique complet de l'individu suivant l'équation de confort de Fanger.</p>	<p>Il est surtout utilisé dans les espaces intérieurs en climat tempéré. En ambiance chaude il évalue mal l'effet de l'humidité car les pertes par sudation ne sont évaluées qu'à partir du métabolisme et l'expression ne fait pas intervenir l'hygrométrie [Moreau, 1999].</p>
<p>PMV*</p> <p><i>Predicted Mean Vote*</i></p> <p>G a g g e</p>	<p>Une nouvelle version du PMV pour augmenter sa sensibilité à l'humidité en ambiance chaude.</p>	
<p>Carte Bioclimatique d'O l g y a y</p> <p><i>Olgyay's Bioclimatic chart</i></p> <p>[Szokolay, 1980]</p>	<p>C'est une méthode graphique qui représente bien l'effet de plusieurs paramètres climatiques, notamment de la température, du vent, de l'humidité et de l'ensoleillement.</p>	<p>La carte n'indique pas le degré de l'inconfort, et son utilisation est limitée à des valeurs d'humidité relative de 15% à 75%. La carte montre bien l'effet du rayonnement solaire pour les températures modérées, et l'effet du mouvement de l'air pour les températures plus élevées. Ainsi l'effet compensatoire des ces paramètres est mis en évidence, mais pas l'effet cumulatif négatif (exemple : vent fort couplé à une température basse).</p>
<p>Carte révisée par Arens et al.</p> <p><i>Bioclimatic chart revised by Arens et al.</i></p> <p>[Arens et al., 1986]</p>	<p>Une nouvelle version de la carte bioclimatique d'Olgyay. Elle contient une innovation, notamment l'utilisation du ERF (Effective Radiant Field ou Champ Effectif de Rayonnement) qui exprime l'effet du rayonnement de grande longueur d'onde.</p>	<p>Le ERF est lié à une hauteur de soleil définie, pour les hauteurs différentes les angles de vue et le ERF doivent être recalculés.</p>

<p>Température Effective (ET) <i>Effective Temperature</i> H o u g h t e n e t Y a g l o g l o u [Auliciens et Szokolay, 1997]</p>	<p>Il combine l'effet de la température de l'air et de l'humidité.</p>	<p>Cet indice surestime l'effet de l'humidité en conditions froides et confortables, tandis qu'il sous estime l'effet de celui-ci pour les températures élevées.</p>
<p>Température Resultante (RT) <i>Resultant Temperature</i> M i s s é n a r d [Auliciens et Szokolay, 1997]</p>	<p>Cet indice est une variante de la Température Effective, et peut être appliqué aux individus en état de repos ou exerçant une activité légère.</p>	<p>Il est un indicateur adéquat du confort thermique en climats modérés, mais il ne peut pas être appliqué pour les conditions tropicales. Il sous-estime l'effet refroidissant du mouvement de l'air pour les températures élevées et les surestime pour les températures basses.</p>
<p>Température Apparente (AT) <i>Apparent Temperature</i> S t e a d m a n [de Dear <i>et al.</i>, 1999]</p>	<p>Il exprime l'inconfort relatif dû à la combinaison de la chaleur et de l'humidité. Il est basé sur des études physiologiques de refroidissement de la peau dû à l'évaporation pour différentes combinaisons de température ambiante et d'humidité relative.</p>	
<p>Indice Tropical Estival (TSI) <i>Tropical Summer Index</i> R o o r k e e [Auliciens Szokolay, 1997]</p>	<p>Cet indice exprime l'effet de la vitesse de l'air sur le confort thermique. Il est basé sur les conditions climatiques locales et le mode de vie (habillement, habitudes etc.).</p>	<p>Cet indice était destiné uniquement aux conditions climatiques de l'Inde et il n'était pas encore testé pour d'autres pays aux conditions climatiques similaires.</p>
<p>Indice Equatorial du Confort (ECI) <i>Equatorian Comfort Index</i> W e b b [Auliciens et Szokolay, 1997]</p>	<p>Il intègre l'effet de la température de l'air, de l'humidité et du mouvement de l'air. Il est applicable uniquement aux sujets réalisant des travaux légers.</p>	<p>L'indice peut uniquement être utilisé pour les activités de référence, exercées par les sujets d'expérimentations et pour des vêtements de référence, portés par les sujets d'expérimentations.</p>

<p>Température Equivalente (EqT) <i>Equivalent Temperature</i> D u f t o n [Auliciems et Szokolay, 1997]</p>	<p>L'indice intègre la température de l'air, la température moyenne radiante et la vitesse de l'air.</p>	<p>Il ne tient pas compte de l'effet de l'humidité, en conséquence il n'évalue pas correctement le confort pour les températures supérieures à environ 27°C.</p>
<p>Température Operative (OT) <i>Operative Temperature</i> W i n s l o w, H e r r i n g t o n & G a g g e [Auliciems et Szokolay, 1997]</p>	<p>L'indice intègre l'effet de la température de l'air et du rayonnement.</p>	<p>Cet indice peut être appliqué en climats modérés où l'effet de l'humidité relative est négligeable. Il est jugé inadéquat pour les températures supérieures à environ 27 °C car il ne considère pas la dissipation de la chaleur par évaporation.</p>
<p>Température Subjective (ST) <i>Subjective Temperature</i> M c I n t y r e [Auliciems et Szokolay, 1997]</p>	<p>Cet indice est basé sur les équations de confort développées par Fanger et est valable pour les espaces intérieurs.</p>	<p>Il n'est pas adapté pour les ambiances chaudes car il ne prend pas en compte l'effet de l'humidité.</p>
<p>Nouvelle Température Effective Standard (SET) <i>Standard Effective Temperature</i> N i s h i & G a g g e [Auliciems et Szokolay, 1997]</p>	<p>Il est basé sur un modèle de réponses physiologiques. Il décrit correctement le confort thermique en climat tropical humide.</p>	<p>Il est très sensible à la variation des paramètres essentiels du climat tropical humide: à la vitesse de l'air et à l'humidité de l'air.</p>
<p>Température Effective Standard Extérieure (OUT_SET) <i>Outdoor Standard Effective Temperature</i> [de Dear et al., 1999]</p>	<p>Cet indice est une variante de l'indice SET* qui est destiné à évaluer le confort thermique en extérieur. L'indice intègre l'effet du vent et l'effet du rayonnement solaire.</p>	

<p>Température Effective Corrigée (CET) <i>Corrected Effective Temperature</i> A S H V E [Auliciems et Szokolay, 1997]</p>	<p>Il indique l'effet de la vitesse de l'air et du rayonnement solaire sous la forme d'un "monogramme".</p>	<p>En environnement chaud il sous-estime l'effet de l'humidité, et surestime l'effet inverse des températures hautes (le corps reçoit un gain thermique dû à la température élevée) couplées à des vitesses d'air basses (0.5 – 1.5 m/s).</p>
<p>Indice de Refroidissement Eolien (WCI) <i>Wind Chill Index</i> S i p l e & P a s s e l [Auliciems et al., 1997]</p>	<p>Ils sont utilisés en climats froids pour décrire l'effet de refroidissement par le vent sur la peau humaine exposée.</p>	<p>L'indice ne donne pas de résultats corrects pour les vitesses du vent inférieures à 2 m/s.</p>
<p>Nouvel Indice de Refroidissement Eolien (WCI) <i>New Wind Chill Index</i> [New Windchill, 2001]</p>	<p>Cet indice intègre les vitesses de vent calculées à la hauteur moyenne du visage humaine (1.5 m). Il est basé sur un modèle du visage et permet de déterminer la quantité de chaleur dissipée par convection dans l'environnement depuis le corps.</p>	<p>L'indice ne tient pas compte de l'effet du rayonnement solaire qui peut éventuellement compenser l'effet refroidissant du vent.</p>
<p>Taux de Sudation Prévu après 4 heures d'exposition (P4SR) <i>Predicted 4-hour Sweat Rate</i> M c A r d l e</p>	<p>Il détermine le stress physique par le taux de sudation, le rythme cardiaque pulse ou température du corps interne, après 4 heures d'exposition. Il sert à étudier l'acclimatation de l'individu. Il est un des indices les plus fiables en conditions chaudes pour des taux de métabolisme et de type de vêtement bien définis.</p>	<p>Il n'évalue pas correctement le confort thermique pour les températures inférieures à 28 °C. Il sous-estime l'effet refroidissant du mouvement de l'air pour un taux d'humidité relative élevé. Le temps d'exposition de 4 heures limite éventuellement le champ d'application de résultats.</p>
<p>Indice de Stress Thermique (TSI) <i>Thermal Stress Index</i> G i v o n i [Auliciems et Szokolay, 1997]</p>	<p>Cet indice détermine la perte d'énergie par sudation requise pour maintenir l'équilibre thermique du corps. Il s'avère être un bon indicateur de l'acclimatation et de la fatigue dans les cas où l'équilibre thermique est maintenu.</p>	<p>Il ne répond pas à la question du confort, il explique plutôt la situation de sollicitation thermique que subit l'individu.</p>

<p>Indice de Stress dû à la Chaleur (HSI) <i>Heat Stress Index</i> B e l d i n g & H a t c h</p>	<p>Il détermine le taux de sudation. Il donne des résultats valables en air calme entre 27 et 35 °C pour une humidité relative de 30-80%. Les températures plus élevées doivent être couplées à des valeurs d'humidité relative plus basses.</p>	<p>Il surestime l'effet refroidissant du mouvement de l'air et également l'effet réchauffant de l'humidité. Il ne peut pas être appliqué dans la zone de confort pas plus que pour les températures basses.</p>
<p>Indice de l'Inconfort (DISC) G a g g e <i>Discomfort Index</i> [Arens et al., 1986]</p>	<p>Cet indice est fonction de la mouillure cutanée en ambiances chaudes et uniquement de la température de la peau en ambiances froides. C'est un indice qui est valable dans des conditions tropicales humides.</p>	<p>Il définit le degré d'inconfort, et non le degré de confort.</p>
<p>Température de Bulbe Humide (WBGT) <i>Wet Bulb Globe Temperature</i> Y a g l o u & M i n a r d [Auliciems et Szokolay, 1997]</p>	<p>Il indique l'effet combiné de la température de l'air, du rayonnement de grande longueur d'onde, du rayonnement solaire et du mouvement d'air. C'est la moyenne pondérée de la température de Bulbe Sec, et de Température de Globe à Bulbe Humide.</p>	<p>Cet indice peut être appliqué pour différents types d'activité (travail léger, modéré, et lourd).</p>
<p>Température perçue (PT) <i>Perceived Temperature</i> J e n d r i t z k y & N u e b l e r [Auliciems et al., 1997]</p>	<p>a base d'origine est l'équation de confort de Fanger. Il a été plus tard modifié afin de pouvoir évaluer l'effet de l'humidité plus précisément.</p>	<p>Il ne considère pas l'effet du vent, en conséquence il n'est pas valable en espace extérieur.</p>

<p>Température Physiologique Equivalente (PET) Physiological Equivalent Temperature [Hoppe, 1999]</p>	<p>Le PET est un des indices les plus récents du confort thermique. Il tient compte de tous les paramètres climatiques et également de ceux dépendant de l'individu (métabolisme, vêtue). Il est basé sur un modèle physiologique de l'individu et sur les variables climatiques extérieures. Il est indépendant du ressenti de chaque individu. Il permet de comparer les conditions extérieures actuelles à une condition équivalente intérieure.</p>	<p>Cet indice est basé sur un bilan physiologique de l'individu, en conséquence il ne tient pas compte du ressenti des individus.</p>
--	---	---

Tableau 7 : Avantages et limitations des indices de confort thermique sélectionnés

2.2.1.5 Les indices et cartes de confort thermique applicables en espace extérieur

Quatre indices et cartes du confort ont été choisis qui intègrent l'effet du mouvement et de température de l'air. Ils permettront de déterminer, dans un premier temps, les conditions aérothermiques confortables dans les espaces extérieures et semi extérieures

Le nouveau facteur de refroidissement éolien (new WCI, new Wind Chill Index, new WCT, new Wind Chill Temperature)

Le nouveau facteur de refroidissement éolien (new WCI) combine la vitesse du vent et la température de l'air de façon à déterminer l'effet de refroidissement de la peau exposée au vent en conditions froides. Il est une variante améliorée de l'indice de refroidissement éolien (WCI) introduit par Siple et Passel en 1945 [Bluestein *et al.*, 1999].

Le nouveau facteur de refroidissement éolien (new WCI) indique la température ressentie par l'individu sur la peau exposée au vent et à la température ambiante (noté T_{air}).

$$WCI = (13.12 + 0.6215 \cdot T_{AIR} - 11.37v^{0.16} + 0.3965 \cdot T_{AIR} \cdot v^{0.16})$$

v (la vitesse du vent) est en km/h

[Équation 18]

Cet indice ne peut être utilisé que pour des valeurs de vitesse du vent supérieures à 2 m/s.

Température Effective Corrigée (CET)

L'indice Température Effective Corrigée est issue de l'indice Température Effective (ET). Un nomogramme a été créé : il combine les effets de l'Humidité Relative (RH), du mouvement de l'air et de la Température de Bulbe Sec (DBT).

L'effet de l'humidité est déterminé par la pente de la droite reliant la valeur de la Température de Bulbe Sec (DBT) à celle de la Température de Bulbe Humide (WBT). L'intersection de cette droite avec les courbes de vitesse de l'air marque une valeur sur la courbe de CET [Auliciems et Szokolay, 1997]

Le nomogramme en forme de poisson illustre que le mouvement de l'air augmente la charge thermique du corps si la température est supérieure à environ 37,8°C. Ceci est indiqué par le renversement des courbes de mouvement de l'air pour ces températures.

La Température Effective Corrigée est un indice applicable aux conditions extérieures et semi extérieures puisqu'il intègre des vitesses jusqu'à 7 m/s. Cependant, il ne fournit pas d'information complète sur l'état thermique de l'individu lorsqu'il est exposé au rayonnement solaire ou lorsqu'il existe une différence importante entre la Température Radiante Moyenne et la Température de Bulbe Sec.

Le nomogramme présenté sur la Figure 38 s'applique aux individus portant une insolation vestimentaire de 1clo, qui est égale à 0.155 m²°C/W [AFNOR 7730, 1995].

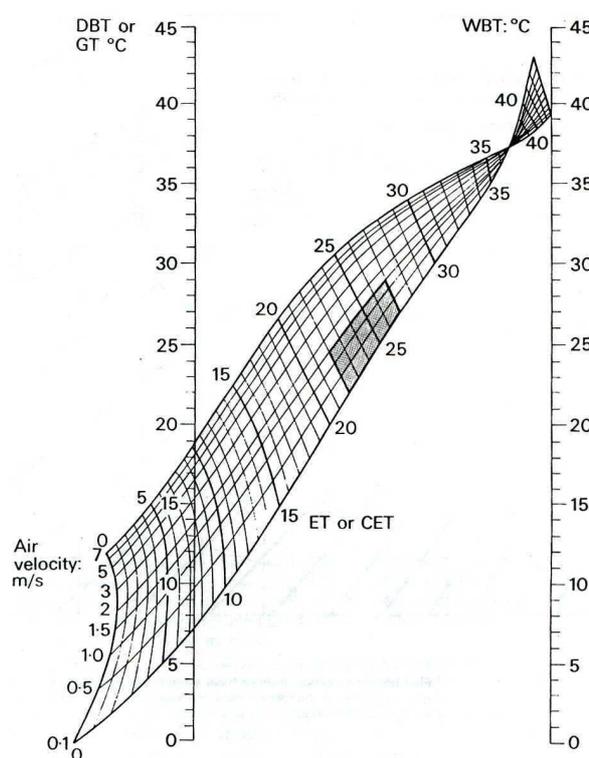


Figure 38 : Nomogramme de CET pour les individus portant une isolation vestimentaire de 1 clo

La carte bioclimatique d'Olgay

Olgay a développé une carte [Szokolay, 1980], qu'il a appelée "carte bioclimatique" (Figure 39) qui illustre l'interaction des quatre paramètres climatiques, que sont la température, le mouvement de l'air, le rayonnement et l'humidité relative. Il a déterminé en termes de Température de Bulbe Sec et d'Humidité Relative une zone de confort sur la carte bioclimatique.

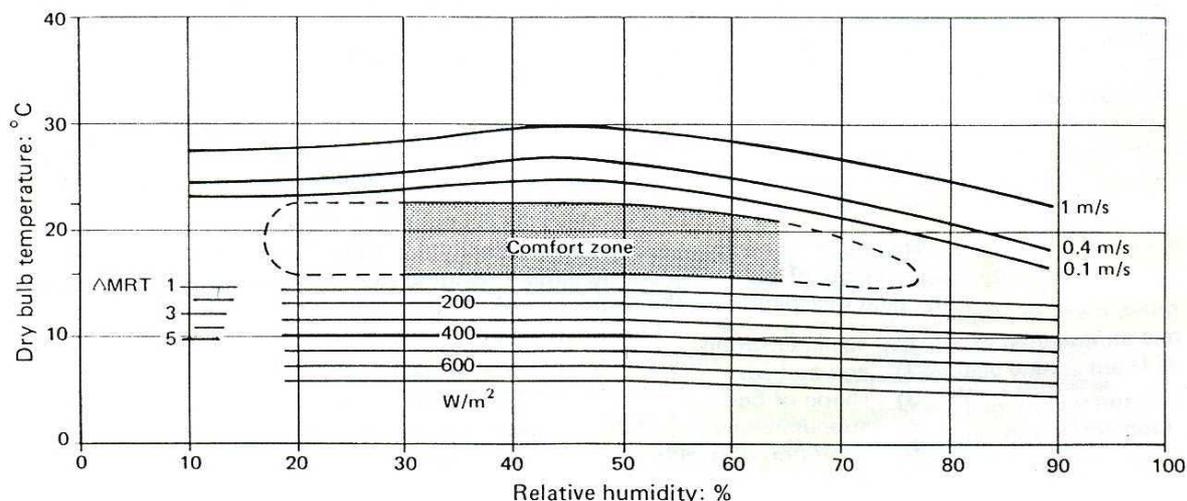


Figure 39 : La carte bioclimatique d'Olgyay [Szokolay, 1980]

Dans cette zone de confort il a supposé un vent calme et aucun échange par rayonnement entre l'individu et l'environnement. La carte montre d'une part l'extension de la limite supérieure de la zone de confort due à la croissance de la vitesse du vent et d'autre part le déplacement de la limite inférieure de la zone de confort par le rayonnement. L'effet du rayonnement peut être pris en compte par l'utilisation d'une échelle de MRT-DBT ou par l'introduction de l'échelle de l'irradiation horizontale (en W/m^2) [Auliciems et Szokolay, 1997].

La carte bioclimatique révisée par Arens et al.

Arens *et al.* ont développé une nouvelle version de la carte bioclimatique [Arens *et al.*, 1986] qui est illustrée sur la Figure 40. Cette nouvelle version est basée sur l'indice de l'inconfort DISC (Indice de l'inconfort) [Tableau 7] calculé par le modèle de thermorégulation de 2 noeuds de Pierce J. B, qui est un modèle mathématique du système thermorégulateur du corps humain développé originellement par Gagge *et al.* en 1970. Le modèle considère l'homme comme deux compartiments concentriques représentant la peau et le noyau interne du corps. Les températures dans chaque compartiment sont supposées uniformes, donc il existe uniquement entre ces compartiments un gradient de température. Le DISC est fonction de la température de la peau dans des conditions froides, et uniquement de la sueur dans des conditions chaudes.

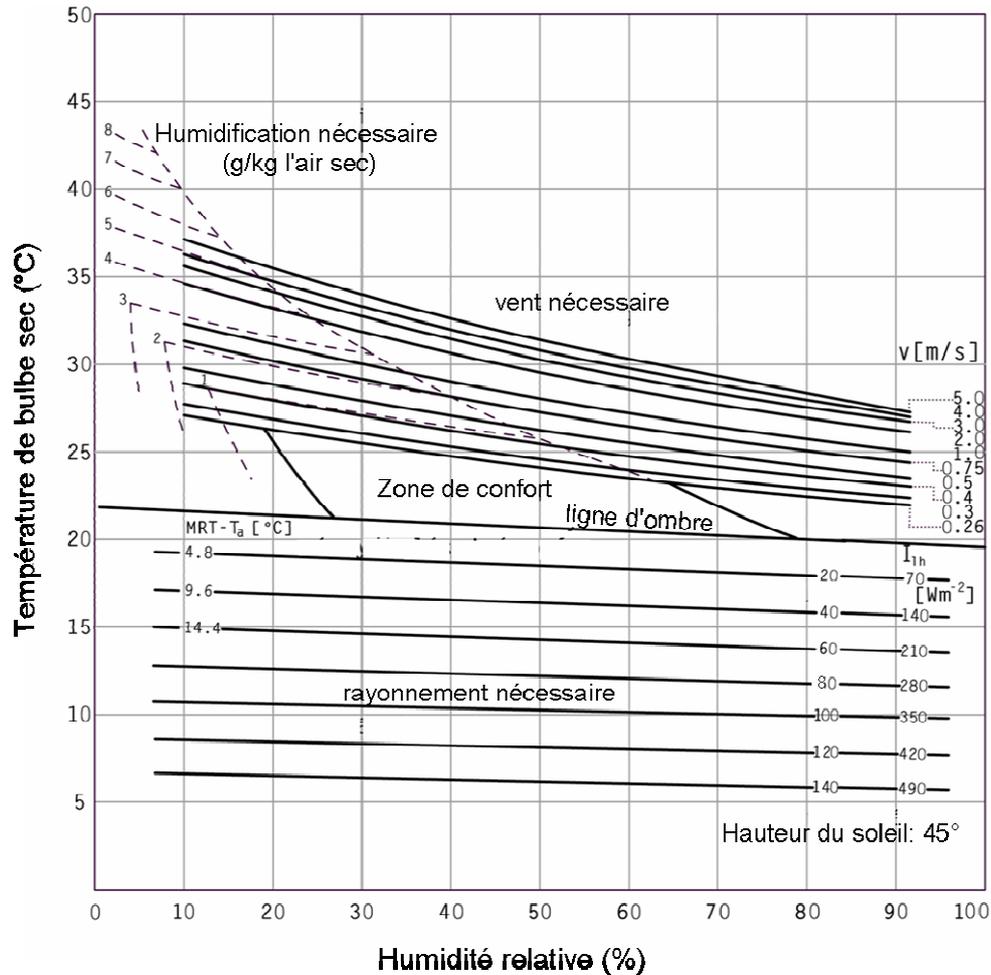


Figure 40 : La carte bioclimatique d'Olgay révisée par Arens *et al.* [Arens *et al.*, 1986]

Dans la zone de confort la température de l'air est supposée être égale à la Température Radiante Moyenne (MRT). Hors de la zone de confort la carte possède des lignes de contours qui correspondent aux différents niveaux du rayonnement additionnel, ou de la vitesse de vent qui permettent de rétablir le confort thermique. L'effet du rayonnement additionnel compense les températures basses, tandis que le vent compense les températures élevées [Arens *et al.*, 1986].

L'utilisation du Champ Effectif de Rayonnement (Effective Radiant Field, ERF) pour évaluer l'effet du rayonnement directionnel est une innovation.

Le ERF décrit le flux rayonnant additionnel de grande longueur d'onde reçu par le corps quand la température des surfaces environnantes diffère de celle de l'air. La température des surfaces environnantes peut être exprimée comme la Température Radiante Moyenne. Le ERF du corps humain est liée à la Température Radiante Moyenne :

$$ERF = f_{eff} \cdot h_r (MRT - T_a) \quad \text{[Équation 19]}$$

où

f_{eff} est la fraction de surface du corps humain exposée au rayonnement ambiant (en m^2);

h_r est le coefficient d'échange par rayonnement (en W/ m^2K);

T_a est la température ambiante (en °K).

L'équation 20 lie les échanges par rayonnement de grande et de courte longueur d'ondes, ce qui permet d'utiliser l'indice ERF pour caractériser les conditions climatiques extérieures. Pour cela, Arens [Arens *et al.*, 1986] utilise plusieurs conventions, notamment l'aire du corps humain modèle (surface Du Bois), les surfaces exposées au rayonnement diffus et directe, la hauteur du soleil, le rapport entre le rayonnement total horizontal et le rayonnement diffus, et le coefficient de réflexion des parois environnantes. Ainsi d'après Arens une différence de 1K entre la Température Radiante Moyenne et la température de l'air ambiant équivaut à l'effet d'environ 7,776 W/m² en termes de ERF. De plus, sous les conditions définies dans l'étude [Arens *et al.*, 1986] l'effet d'un rayonnement de 3,5 W/m² de courte longueur d'onde sur un plan horizontale équivaut à l'effet 1 W/m² mesuré en ERF - en raison des différences entre les surfaces du corps humain exposées au différentes sortes du rayonnement (direct, diffus et réfléchi).

$$ERF \cdot \alpha_{LW} = \frac{\alpha_{SW}}{A_D} \left[f_{eff} \cdot \frac{A_D}{2} \cdot (I_d + I_r) + A_P \cdot I_N \right] \quad \text{[Équation 20]}$$

où

α_{LW} est l'absorptivité de grande longueur d'onde (≈ 0.95);

f_{eff} est la fraction de surface du corps humain exposée au rayonnement ambiant (en m²);

A_D est la surface de Dubois ($\approx 1.8 \text{ m}^2$);

I_d est l'irradiation diffuse en W/m² d'une surface horizontale orientée vers le haut;

I_r est l'irradiation réfléchie en W/m² d'une surface horizontale orientée vers le bas;

A_P est la surface projetée d'un individu type exposé au rayonnement direct pour une élévation solaire $\beta=45^\circ$;

I_N est le rayonnement solaire direct en W/m² mesuré perpendiculairement à la surface;

α_{SW} est l'absorptivité du rayonnement de courte longueur d'onde pour une peau blanche et pour un habillement type (≈ 0.67).

Chacun des indices et cartes de confort listés ci-dessus permettent d'évaluer l'influence des quatre paramètres climatiques sur le confort. Parmi eux le plus prometteur est la carte bioclimatique révisée par Arens et al. puisqu'elle offre la possibilité d'analyse suivante.

Une situation de référence de confort aérothermique a été choisie sur la base des études menées par Spagnolo *et al.* [Spagnolo *et al.*, 2003] : 26°C de Température de Bulbe Sec et 50% d'Humidité Relative. La combinaison de la température et de l'humidité correspondant à la situation de référence peut être lue à partir de la carte.

Concernant le confort aérothermique la carte illustre qu'**au-delà de certaines valeurs de Température de Bulbe Sec (DBT)**, ou plus précisément au-delà de certaines valeurs du couple Température de Bulbe Sec (DBT) / Humidité Relative (RH), afin de maintenir un état thermique confortable, **l'effet compensatoire du mouvement de l'air est nécessaire. Ce mouvement de l'air compense l'effet des températures élevées. Ces vitesses doivent être prises en compte comme les valeurs de mouvement de l'air requises pour maintenir le confort aérothermique.** Une température croissante fait augmenter la vitesse de l'air minimale requise pour le maintien du confort thermique. L'augmentation de la température couplée à des valeurs d'humidité relative élevées fait croître le mouvement de l'air minimal requis d'une façon plus intense que des valeurs identiques de température couplées à des valeurs d'humidité relative basses. Evidemment, **la vitesse de l'air requise ne doit pas dépasser le seuil mécanique de 3.6 m/s.**

La carte bioclimatique révisée par Arens *et al.* tient compte du vêtement et de l'activité pour des valeurs de 0.8 clo (insolation vestimentaire; 1clo est égale à 0.155 m²C/W [AFNOR 7730, 1995]) et 1.3 met (≈ 75.4 W/m²). La carte a été conçue pour une latitude de 45° (pour l'intégralité des Etats-Unis) mais une courbe de correction est disponible pour des latitudes différentes.

Dans la zone de confort la température est supposée être égale à la température radiante moyenne (MRT). En dehors de la zone de confort pour les valeurs basses de la température, la carte a des lignes de contours qui signifient différents niveaux du rayonnement. Le long de ces lignes des niveaux de rayonnements additionnels choisis permettent de rétablir le confort thermique du corps humain à la plus proche limite de la zone de confort.

Le rayonnement est déterminé par trois indicateurs différents dans la carte: la température radiante moyenne (MRT), le champ effectif de rayonnement (ERF) et l'insolation horizontale totale (ITH).

La mesure du rayonnement solaire (direct et diffus) incident sur une surface horizontale est l'insolation totale horizontale ITH exprimée en W/m². Elle varie selon la hauteur du soleil. En conséquence, la surface du corps exposée au rayonnement solaire, et donc l'énergie solaire reçue par le corps sont également fonction de la hauteur du soleil –pour une position type choisie.

Lors de l'évaluation du confort thermique des spectateurs dans les stades il est nécessaire de tenir compte de l'effet cumulatif de ces différents paramètres climatiques, et en particulier de la combinaison du rayonnement de courte et de grande longueur d'ondes et du vent.

2.2.2 Le confort thermique dans les stades

De nombreuses études menées en espaces semi extérieurs et extérieurs portent sur le confort thermique en espace urbain. Peu de travaux portent sur le confort thermique dans les espaces semi extérieurs et encore moins sur le confort thermique des spectateurs dans les stades. Les quelques travaux menés sur le confort thermique dans ces espaces soulignent qu'**en espace extérieur et semi extérieur en raison**

de la forte variation des facteurs climatiques, on ne peut pas attendre que les conditions soient confortables 100% du temps [Nikopoulou *et al.*, 2001]. Dans cet esprit concernant les espaces à la fois ouverts et couverts de l'EXPO '92 à Séville, le but était de réduire la température ambiante afin d'améliorer le confort thermique des usagers. L'exemple le plus illustratif est "le Palenque", un espace de festivité couvert par de la toile tendue [Alvarez *et al.*, 1991]. Sous cette couverture la température ambiante est réduite par la technique de rafraîchissement évaporatif : lorsque dans un courant d'air on fait évaporer des gouttes d'eau la température de cet air diminue et parallèlement il se charge en humidité. Ce procédé est déclinable sous de nombreuses formes, c'est le principe des fontaines à jet, des brumisateurs, des tours de refroidissement etc. [Vinet, 2000]. L'effet rafraîchissant a été intensifié par l'utilisation de brasseurs d'air et de tours de refroidissement.

Parmi les paramètres affectant le confort thermique, le mouvement de l'air, en d'autres termes le vent a un rôle primordial également dans les stades.

Fiala *et al.* [Fiala *et al.*, 1999] ont effectué des études concernant en particulier le confort thermique des spectateurs pour un après midi "modèle" ou type d'été dans le Stade de Sydney en Australie sous deux sortes de toitures : semi transparente et opaque. Ils ont démontré par un modèle numérique qui permet d'évaluer préalablement les réponses des spectateurs vis-à-vis de leur ambiance thermique que **sous une toiture semi transparente les spectateurs seront exposés à des conditions climatiques dégradées** (Figure 41) :

Au niveau de la partie haute des tribunes sous une toiture semi transparente, les spectateurs sont exposés à un rayonnement de 360 W/m^2 sous la forme de rayonnement de courte longueur d'onde.

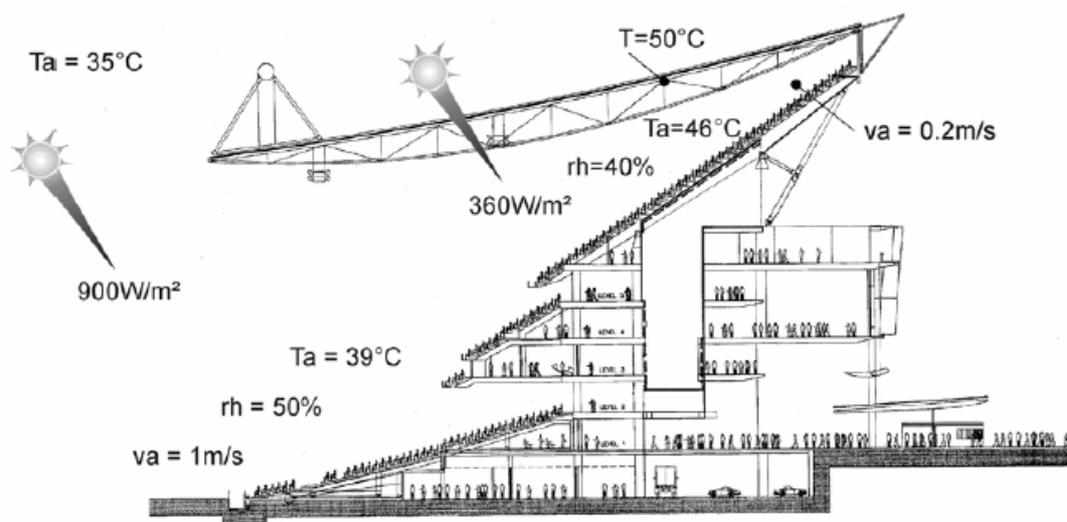


Figure 41 : Conditions climatiques sous une toiture semi transparente illustrées sur la coupe du Stade de Sydney en Australie pour un après midi type d'été [Fiala *et al.*, 1999].

La température de la surface de toiture peut atteindre 50°C , car le rayonnement solaire est absorbé par la toiture. Les simulations de CFD ont indiqué que cette température élevée couplée avec un vent de

direction telle qu'il s'oppose aux forces de convection naturelle : le mouvement de l'air au niveau des tribunes hautes serait restreint ce qui peut provoquer une augmentation de la température d'environ 11K par rapport à l'air ambiant. Les conditions climatiques sous une toiture semi transparente sont illustrées par la Figure 41.

Le stress thermique dû à la chaleur peut être évité par l'ombrage de la toiture transparente ou par le remplacement de cette dernière par une toiture opaque. Une mesure alternative consiste à réduire le risque de vent de calme au niveau des parties hautes des tribunes : des jalousies amovibles sont ajoutées entre la toiture et les gradins.

Cependant, au niveau des sièges qui ne sont pas protégés par la toiture et sont donc exposés au soleil, les spectateurs peuvent recevoir un gain thermique d'environ 900 W/m². Ceci associé à la chaleur produite par les spectateurs provoque une augmentation locale de température de l'air d'environ 4K par rapport à la température de l'air ambiant.

Dans un stade de grande capacité, par exemple 80 000 places, les spectateurs dégagent une quantité de chaleur considérable : entre 8000 et 10 000 kW, ce qui égale à environ 400 W/m² si la surface considérée est la tribune. Cette chaleur considérable peut être une source d'inconfort thermique, surtout s'il est couplé à des périodes de vent de calme.

Les résultats des études menées par Fiala *et al.* [Fiala *et al.*, 1999] mettent en évidence que les caractéristiques photométriques du matériau de la couverture de la toiture affectent significativement les conditions climatiques, en particulier au niveau des parties hautes des tribunes. Ils constatent également que non seulement les vitesses importantes de vent, mais aussi le manque de mouvement d'air peut être source d'inconfort, en particulier quand il est couplé à des valeurs élevées de température de l'air (DBT) et à celles de la température radiante moyenne.

Radunz [Radunz, 2003] évoque l'effet important de la température radiante moyenne sur le confort thermique des spectateurs. Il souligne également que la position des spectateurs affecte l'échange thermique avec l'environnement. Concernant notamment les stades, où les spectateurs sont assis, une partie importante de leur corps est en contact avec le siège. Pour cette raison les échanges par conduction doivent également être pris en compte.

Radunz traite également des échanges par rayonnement de grande longueur d'ondes entre les spectateurs et les surfaces environnantes, en particulier la toiture et les tribunes. Par des simulations numériques il démontre qu'un spectateur seul sur une tribune reçoit plus d'énergie par rayonnement de grande longueur d'onde depuis la tribune que depuis la toiture.

La réalité de ce scénario est contestable. Si l'intégralité de la tribune est occupée par les spectateurs, le facteur de forme entre l'individu et la tribune est réduit, en conséquence les échanges thermiques entre l'individu et la tribune sont réduits aussi. En même temps l'individu effectue des échanges en

particulier par rayonnement avec les autres individus qui le jouxtent. Le résultat de cet échange est négligeable car les individus ont des températures très voisines.

Ce phénomène est nommé l'effet pingouin [Blows, 1998].

Ces calculs justifient le fait que les échanges par rayonnement sont affectés dans une large mesure par l'émissivité et l'absorptivité de la surface supérieure et inférieure de la toiture. La géométrie, notamment l'effet du facteur de forme sur ces échanges est également significatif, néanmoins il serait nécessaire d'analyser plusieurs configurations afin de pouvoir l'évaluer plus précisément.

L'étude menée par Bouyer [Bouyer, 2004] porte sur l'application de l'indice PET (Température Physiologique Equivalente) pour évaluer le confort thermique dans des espaces semi extérieurs en particulier dans les grands stades. Le confort thermique dans trois différents stades a été évalué par un code de calcul qui intègre l'indice PET en utilisant les données expérimentales obtenues en soufflerie.

"La PET est définie comme la température de l'air d'une ambiance intérieure qui conduit, du point de vue énergétique aux mêmes conditions thermophysiques que sur le site extérieur considéré. Elle donne une évaluation quantitative d'un environnement thermique particulier en tenant compte de toutes les variables thermo aérauliques. La PET intègre le vent, la température de l'air, l'humidité et tous les flux radiatifs. Le calcul de cet indice repose sur un modèle physiologique d'individu type (morphologie, grandeurs énergétiques et habillement) et sur des variables microclimatiques extérieures." [Bouyer, 2004]

La PET caractérise le confort uniquement du point de vue de l'environnement thermique de l'individu indépendamment du ressenti de chaque individu.

Bouyer présente le calcul de l'indice et son application. Il applique le modèle en régime permanent puisque les spectateurs sédentaires sont présents pour assister à un événement pendant quelques heures. Il suggère que la non permanence des conditions météorologiques peut être interprétée comme la succession d'états d'équilibre. Il illustre les valeurs de PET au niveau des tribunes sous la forme de cartes d'iso valeurs pour les trois stades étudiés en soufflerie au CSTB Nantes:

- Stade Atatürk à Istanbul,
- Stade de France à Saint-Denis,
- Stade de Gerland à Lyon.

Son approche consiste à comparer ces cartes par rapport à leur implantation, leurs propriétés géométriques, en particulier le degré de fermeture et aussi le choix des matériaux. L'interprétation des résultats a conduit à quelques observations qualitatives et quantitatives :

- La dépendance de la PET vis-à-vis des grandeurs radiatives a été mise en évidence. Les cartes d'iso valeurs de PET présentent des formes qui ressemblent plus aux rendus de simulations solaires qu'aux cartes aérauliques. Ceci est d'autant plus vrai dans les stades très protégés du

vent où la porosité de façade est réduite et dans ceux qui sont très protégés du soleil, en d'autres termes où l'ouverture au ciel est réduite [Bouyer, 2004].

- La cartographie de la PET est un bon outil visuel pour caractériser le confort. Les niveaux des températures observées au niveau des tribunes peuvent être ponctuellement très élevées à cause des flux solaires d'été importants. "La définition propre de l'indice PET, équivalent à une température d'air intérieur, nous suggère d'écarter les PET supérieures à 30°C-32°C d'un domaine fictif acceptable de confort, mais ce serait contester un trop grand nombre de zones dans les tribunes en période estivale. "

Bouyer démontre que l'indice PET peut être un outil pour estimer quantitativement et qualitativement l'environnement thermique de l'individu. En définissant les conditions de PET "limites" pour un spectateur moyen/type, éventuellement par secteur ou par tribune on peut identifier les zones confortables ou inconfortables. Cependant, il a éclairci le fait que le recours unique à la PET n'est pas suffisant pour conclure sur l'ambiance climatique d'un stade. Il est également nécessaire d'analyser en détail, notamment localement l'effet des apports solaires et des niveaux de vent. Il a proposé d'envisager une cartographie de confort plus complète qui croise ces aspects.

Il évoque également, que la définition du confort dans les stades est avant tout locale, néanmoins certaines des observations préliminaires laissent entrevoir la possibilité d'une analyse globale.

L'indice PET sert principalement à décrire le confort thermique d'un spectateur type ou d'un groupe de spectateurs types dans un secteur de tribune bien défini. Il présente des variations fortes dans l'enceinte du stade. C'est pourquoi, il est difficile de l'employer pour une analyse globale (tout le stade) et générale (toutes les types de stades).

Les études menées sur le confort thermique des spectateurs dans les grands stades se focalisent sur des stades particuliers de positions géographiques données. Elles illustrent des conditions impliquées par la concomitance des paramètres climatiques définis pour certaines heures et périodes courtes (exemple : un après-midi type de l'été) choisies. En conséquence, elles ne fournissent pas de résultats qui permettraient d'une part de décrire les conditions aérothermiques dans l'intégralité des tribunes pour une période longue (pour une saison ou pour l'année) et d'autre part d'évaluer le confort aérothermique des spectateurs du stade.

2.3 L'APPROCHE GENERALE DU CONFORT VISUEL

2.3.1 La source de lumière du jour

Dans le cadre de l'extension de ce travail seul l'effet de la lumière du jour sur le confort visuel des spectateurs est approché.

L'œil humain est sensible à la lumière, c'est-à-dire aux rayonnements électromagnétiques monochromatiques ou complexes, comportant des radiations de longueurs d'ondes comprises entre 400 et 700 nanomètres (nm). L'œil ne voit donc pas les radiations infrarouges et ultraviolettes, par ailleurs il n'est pas également sensible à toutes les radiations du domaine visible. En vision diurne (dite également photopique) l'œil a son maximum de sensibilité pour la radiation de longueur d'onde 555 nm (de couleur vert-jaune) [AFE, 1992].

Les sources de lumière du jour sont le soleil et le ciel. Elle est caractérisée par l'intensité du rayonnement solaire, ce qui affecte non seulement le confort visuel, mais encore le confort thermique de l'individu.

L'éclairement du rayonnement solaire incident normale à une surface *hors de l'atmosphère* varie au cours de l'année d'environ 6% suivant la distance terre - soleil. Sa valeur moyenne annuelle est de 1367 W/m^2 , ce qui équivaut en terme d'éclairement à 133 800 lux.

La Figure 42 illustre la répartition spectrale du rayonnement solaire. 98% de l'énergie du rayonnement solaire se situe dans un intervalle de longueur d'onde entre 0.22 et $4 \mu\text{m}$ [Radunz, 2003].

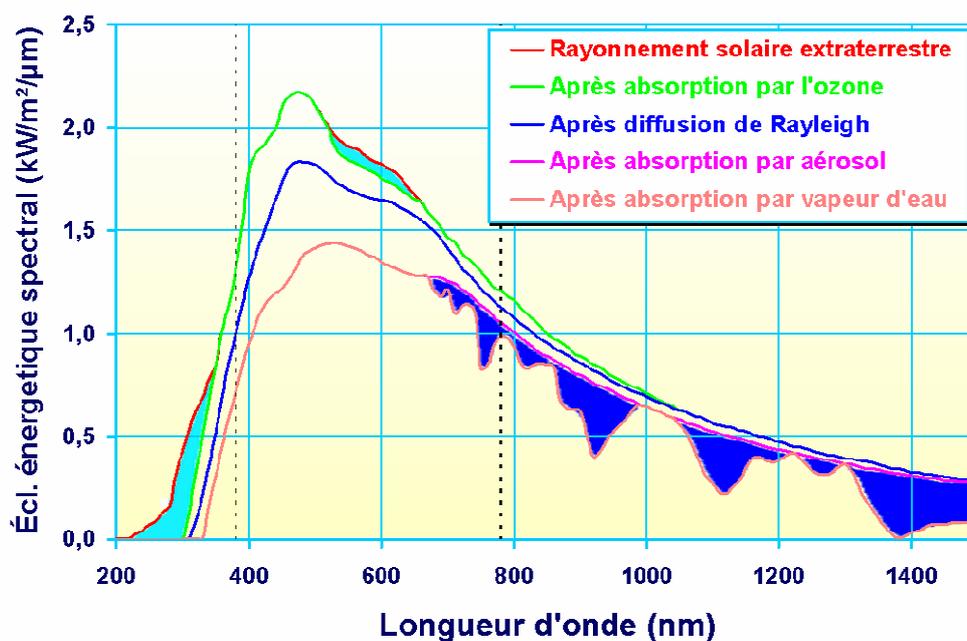


Figure 42 : Spectre du rayonnement solaire [Perraudeau, 1999]

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire – comme montré par la Figure 43 - est absorbé, diffusé et réfléchi. Il se manifeste sous la forme d'un rayonnement *direct* atténué, provenant directement du soleil, et d'un rayonnement *diffus* provenant de toute la voûte céleste. A la surface du sol, le rayonnement solaire global est la somme du rayonnement solaire direct et diffus.

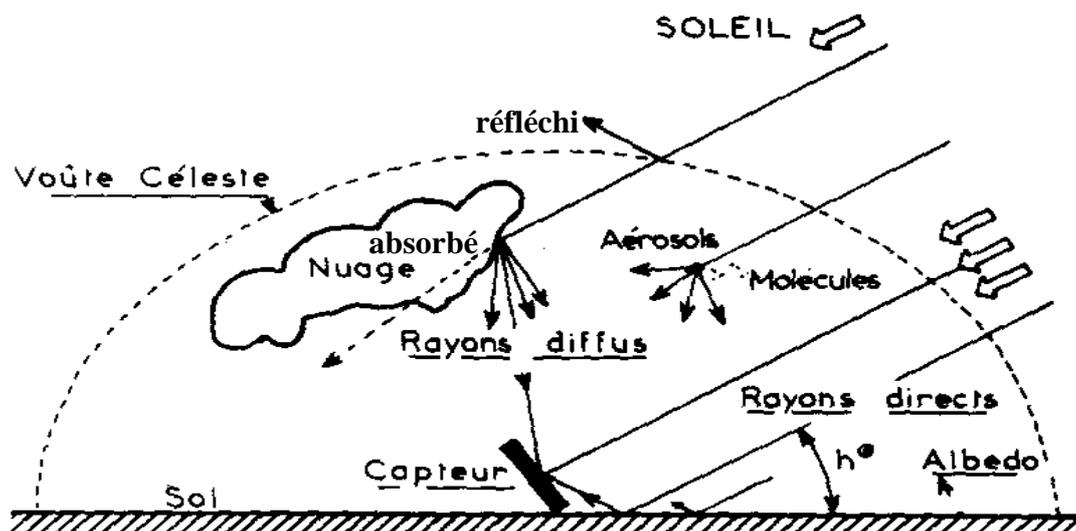


Figure 43 : Phénomènes du rayonnement solaire [Perrier, 2005]

L'irradiation solaire directe mesurée sur un plan horizontal dépend entre autres, de la hauteur du soleil au dessus de l'horizon et du facteur de trouble du ciel allant de "ciel bleu très clair" à "ciel laiteux très pollué" [Radunz, 2003]. Ainsi, en été lorsque le soleil est plus haut sur l'horizon et le ciel est parfaitement dégagé, l'intensité du rayonnement direct est très importante.

En espace extérieur l'éclairage présente une variabilité très importante qui est fonction des conditions météorologiques. La Figure 44 donne un exemple de l'éclairage extérieur de forte variabilité.

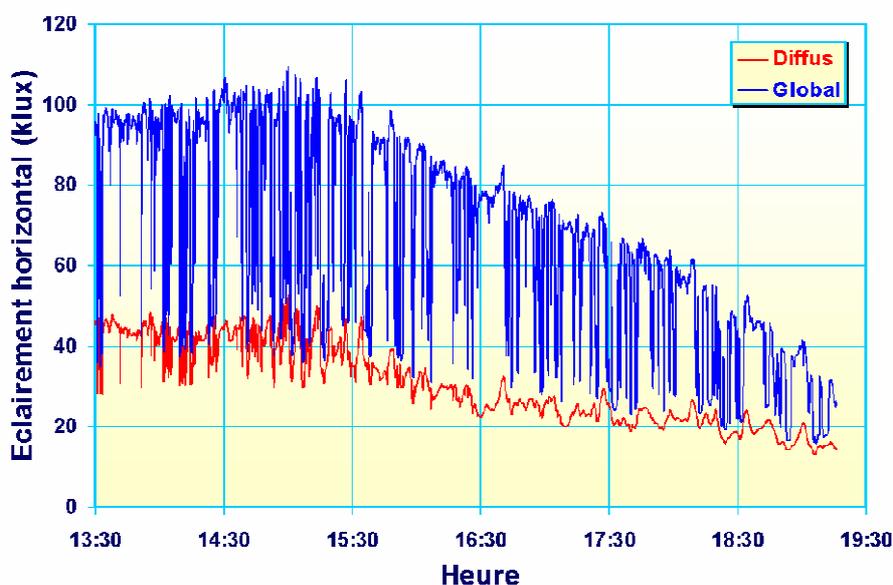


Figure 44 : Exemple d'une variabilité forte de l'éclairage extérieur

L'irradiation solaire diffuse mesurée sur un plan horizontal dépend principalement de trois facteurs : la hauteur du soleil, la teneur en vapeur d'eau et en aérosol de l'atmosphère et la couverture nuageuse. Sous ciel couvert, l'apport énergétique par rayonnement diffus est beaucoup plus important que le direct et un plan horizontal recevra plus ce type de rayonnement que de rayonnement direct. La quantité d'énergie diffuse est moins importante en été car le soleil est plus haut sur l'horizon : la couche atmosphérique que les rayons doivent traverser est moins épaisse, ce qui diminue la probabilité de diffusion des ondes.

La surface du sol renvoie une partie du rayonnement visible reçu. La fraction réfléchie varie selon la nature de la surface du sol et la hauteur du soleil. Un coefficient qui s'appelle l'albédo définit la partie réfléchie par une surface lorsqu'elle reçoit du rayonnement. La partie du rayonnement solaire qui est absorbé par le sol et par l'atmosphère est réémise de façon thermique dans la gamme du rayonnement infrarouge avec un maximum d'émission d'environ 10 μm selon la Loi de Wien [Radunz, 2003].

2.3.2 Confort visuel dans les stades

Le confort visuel est un état d'esprit lorsque l'individu exprime une satisfaction par rapport à son ambiance visuelle.

Les conditions lumineuses dans les stades en lumière du jour sont affectées en outre des conditions météorologiques, par la morphologie du stade, notamment par la forme, les dimensions, la position de la toiture et aussi par la caractéristique photométrique du matériau de sa couverture. Les matériaux de couvertures habituellement employés pour les stades sont de trois sortes :

- **opaque**, qui ne transmet pas de rayonnement dans le domaine spectral considéré;
- **transparent**; qui a une transmission essentiellement régulière et qui a habituellement un facteur de transmission régulière élevé dans le domaine spectral considéré [CIE, 1987].
- **translucide**; qui transmet le rayonnement visible essentiellement par transmission diffuse dans une direction privilégiée, de sorte que les objets ne sont pas vus distinctement au travers d'un tel milieu [CIE, 1987].

Du choix de ces matériaux résultent différentes conditions d'ensoleillement à l'"intérieur" du stade.

En ce qui concerne les exigences relatives à la qualité de l'éclairage, celles des joueurs sont différentes de celles des spectateurs. De plus, les exigences imposées par les retransmissions télévisées par rapport à la qualité d'éclairage ne correspondent ni à celles des joueurs, ni à celles des spectateurs. Les joueurs peuvent s'accommoder d'un niveau d'éclairement relativement faible tandis que les spectateurs sont plus exigeants. Les exigences des spectateurs varient en fonction de la distance à l'aire de jeu, en

d'autres termes elles dépendent de la distance entre l'aire de jeu et les spectateurs les plus éloignés. Pour les films et les retransmissions télévisées en couleur, les valeurs d'éclairage doivent être beaucoup plus élevées [AFE, 1992].

La qualité de l'éclairage d'un terrain de jeu par la lumière du jour est caractérisée par :

- le niveau d'éclairage horizontal;
- le niveau d'éclairage vertical;
- l'uniformité de ces éclairages;
- le degré d'éblouissement produit par les sources (exemple : soleil);
- l'aspect visuel du terrain (luminance de l'aire de jeu).

En espaces extérieures les raisons principales d'inconfort visuel sont **le contraste** et **l'éblouissement**.

La notion de **contraste** peut être interprétée de deux façons :

- Au sens perceptif : évaluation de la différence d'aspect de deux ou plusieurs parties du champ observé, juxtaposées dans l'espace ou dans les temps (d'où le contraste de luminosité, contraste de clarté, contraste de couleur, contraste simultané, contraste successif etc.).
- Au sens physique : grandeurs associées au contraste de luminosité perçue, généralement définies par une formule qui fait intervenir les luminances (L) des stimuli considérés, par exemple : $\Delta L/L$ au voisinage du seuil de luminosité, ou L_1/L_2 pour les luminances beaucoup plus élevées.

La luminance permet de quantifier l'impression lumineuse perçue par un observateur qui regarde une source. Elle s'exprime comme le rapport entre l'intensité émise en direction de l'œil et la surface apparente qui émet cette intensité. La luminance s'exprime en cd/m^2 .

Un contraste au sens perceptif est confortable pour les yeux si le rapport de surfaces éclairées différemment et juxtaposées ne dépasse pas la valeur de 20. Si cette valeur se trouve entre 20 et 50, le contraste est inconfortable et devient très inconfortable au-delà de 50 [Perraudeau; 1999].

L'éblouissement est une condition de la vision dans laquelle l'observateur éprouve soit une gêne, soit une réduction de l'aptitude à distinguer des objets, soit les deux simultanément, en raison de la présence d'une source trop intense dans le champ visuel [IIDRIS, 1997]. Le phénomène d'éblouissement apparaît dans des conditions où la valeur de luminosité se trouve entre 10^4 et 10^5 cd/m^2 [Perraudeau, 1999].

Il existe deux sortes d'éblouissement :

- éblouissement perturbateur;
- éblouissement inconfortable.

L'éblouissement perturbateur se produit quand la luminosité atteint des valeurs extrêmes ou quand le contraste devient trop important; il entraîne une perte momentanée de la vision.

L'éblouissement inconfortable entraîne une diminution de la performance visuelle sans atteindre le seuil de la douleur. Cet éblouissement est exprimable par le contraste [Fiori, 2004].

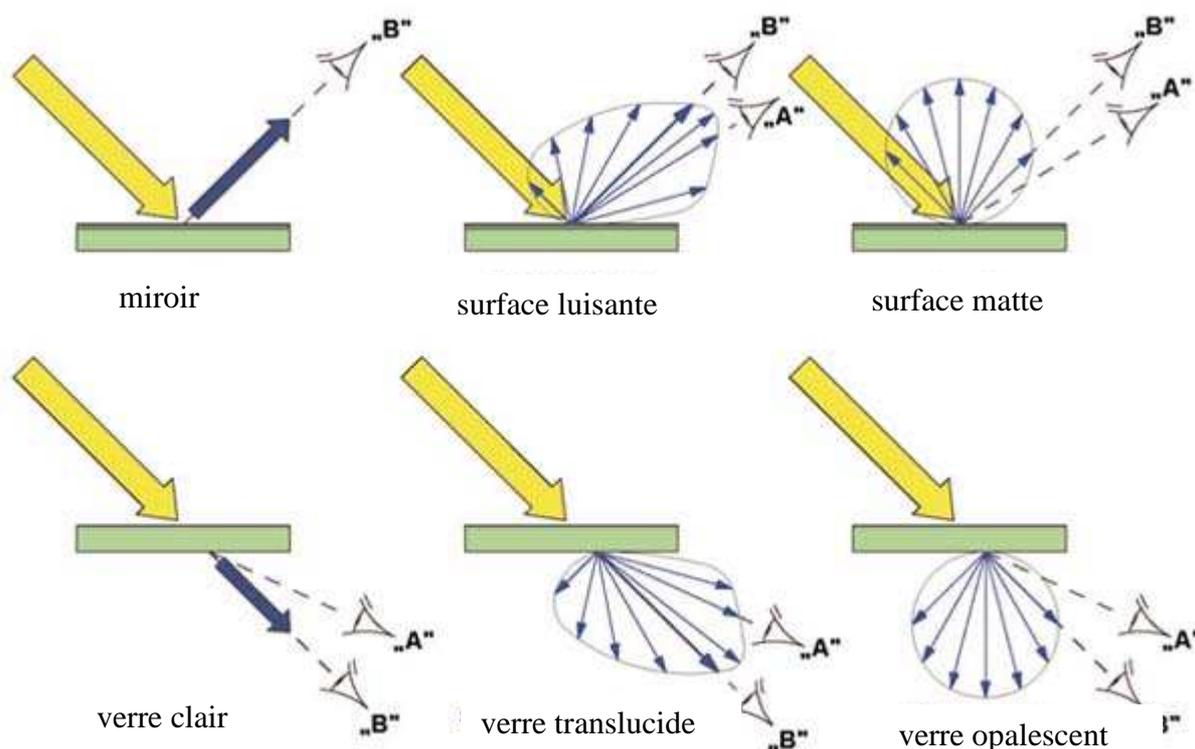


Figure 45 : Lumière réfléchi des différentes surfaces et lumière transmise par différents matériaux [ECOBUILD, 2005]

La modification de l'incidence de la lumière réfléchi dépend de la qualité des surfaces tandis que le caractère de la lumière transmise est fonction des caractéristiques photométriques du matériau. Ceci est illustré par la Figure 45. L'emploi de surfaces brillantes est à éviter dans les stades. En réfléchissant la lumière dans une direction privilégiée elles peuvent causer le phénomène d'éblouissement chez les spectateurs et également chez les joueurs. De plus, elles peuvent provoquer une gêne visuelle importante pour les téléspectateurs lors des retransmissions télévisées. Cependant l'utilisation des matériaux qui favorisent la transmission de la lumière peut être avantageuse du point de vue de l'ensoleillement du stade.

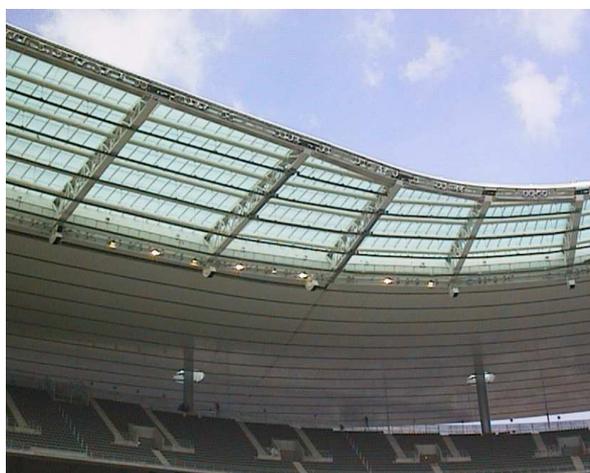


Figure 46 : La toiture du Stade de France [Garcia *et al.*, 1997]

Les conditions lumineuses en lumière du jour du Stade de France ont été étudiées par la Division Eclairage et Colorimétrie du CSTB Nantes. La toiture est constituée d'une partie opaque et d'une partie transparente. L'influence des différents types de verres, notamment clair et opalescent sur l'éclairage de la pelouse a été déterminée.

Les matériaux opalescent et clair ont été choisis car ils amènent la lumière dans les zones de plus forte ombre. Une couverture de la couronne intérieure en verre clair et également en verre opalescent limite globalement les contrastes sur le terrain dus à l'ombre portée de la toiture.

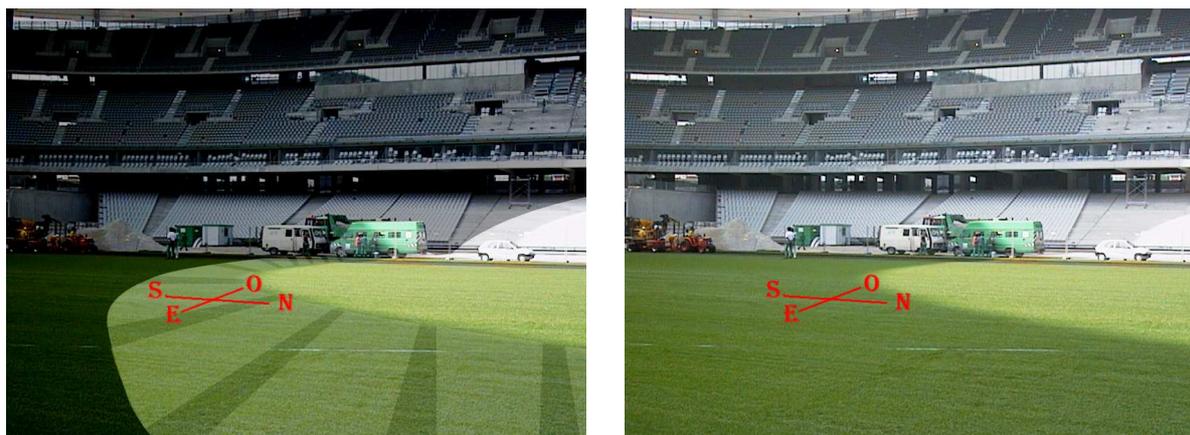


Figure 47 : Caractère de l'ombre de la toiture projeté sur l'aire de jeu par une verrière claire (image de gauche) et par une verrière opalescente (image de droite) [Garcia *et al.*, 1997].

Le but recherché est de faire disparaître les ombres portées dues aux poutrelles métalliques supportant les plaques de verres tout en tentant de minimiser les contrastes extrêmes des luminances de la pelouse par temps clair. La Figure 47 montre l'efficacité du verre opalescent pour diffuser de la lumière dans les zones de plus forte ombre.

Le Figure I.2.48 illustre qu'un matériau opalescent permet de redistribuer la lumière de la zone de pénombre dans la zone d'ombre. La zone de pénombre correspond à la projection de la couronne intérieure de la couverture sur le terrain. Les mesures sur le terrain ont confirmé les résultats de l'étude théorique : l'ombre portée de la structure métallique supportant une verrière opalescente a totalement disparu. Ces mesures ont également confirmé le caractère diffusif de la verrière opalescente:

- L'évolution des valeurs d'éclairage sous la verrière opalescente est régulière, le contraste entre la partie à l'ombre de la verrière et la partie à l'ombre de la toiture est indiscernable.
- Les valeurs d'éclairage mesurées à l'ombre de la verrière opalescente et de la partie opaque de la toiture sont supérieures à celles qui auraient pu être observées sous une verrière opaque ou composé de verre clair. Ceci est dû aux caractéristiques photométriques du verre opalescent qui diffuse la lumière transmise dans toutes les directions.

Les Figures 48 et 49 et 50 montrent l'effet des caractéristiques photométriques de différents matériaux de couverture sur l'ensoleillement de l'aire de jeu du stade.

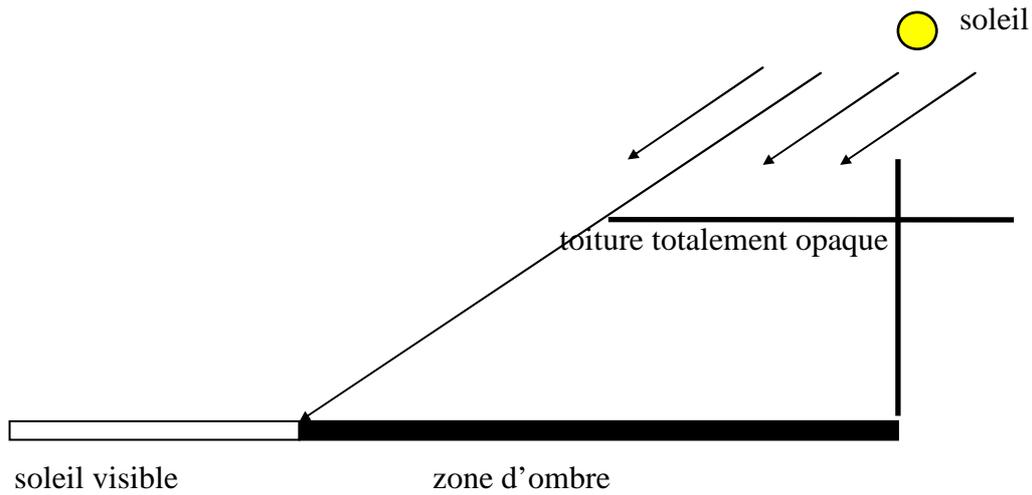


Figure 48 : Cas d'une toiture opaque [Garcia *et al.*, 1997]

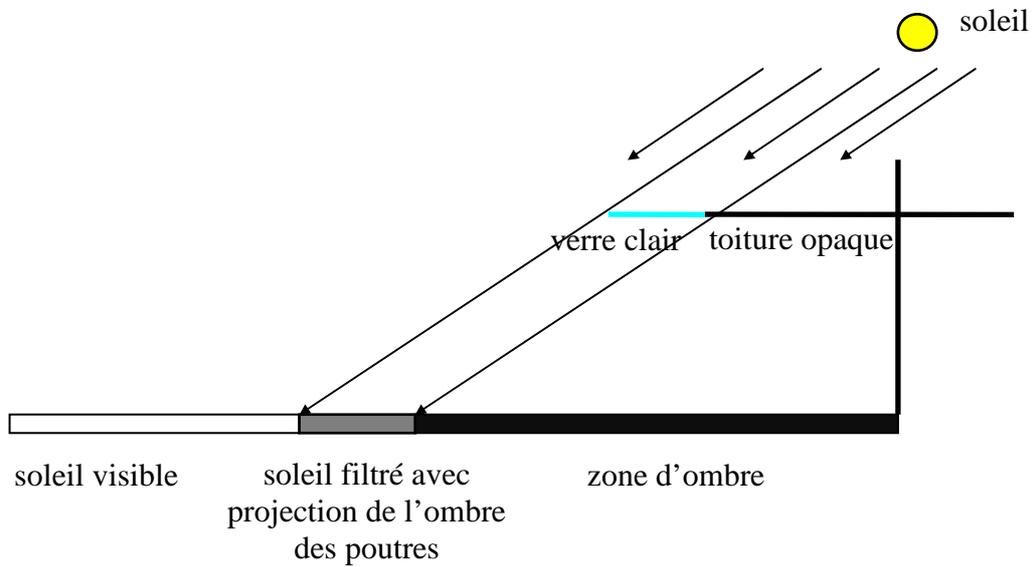


Figure 49 : Cas d'une toiture qui se compose d'une partie opaque et d'une partie de verre clair

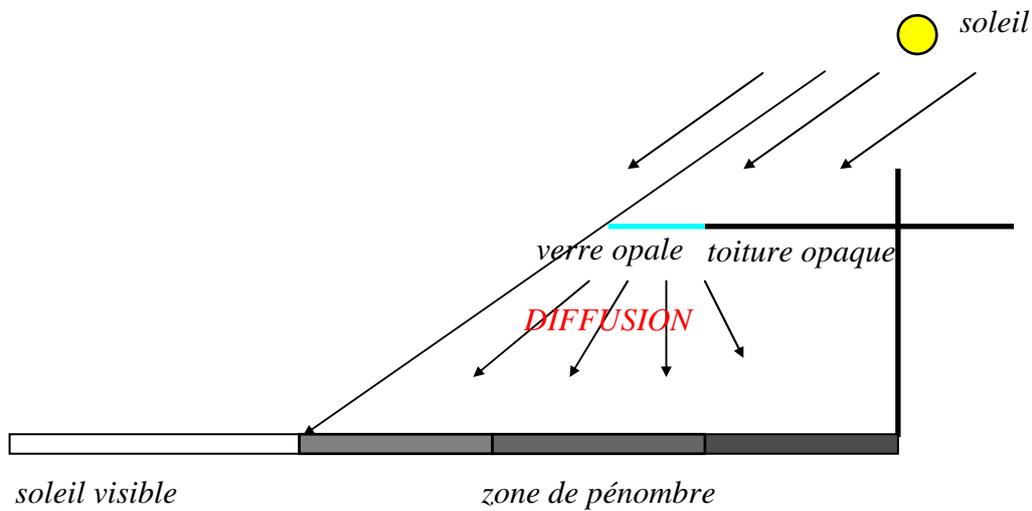


Figure 50 : Cas d'une toiture qui se compose d'une partie opaque et d'une partie de verre opalescent

Le matériau opalescent

- permet d'éviter les hétérogénéités dues aux ombres des poutres de la toiture sur le terrain;
- favorise l'homogénéité des éclairagements verticaux sur les joueurs;
- limite les risques d'éblouissement liés à la vision directe du soleil.

L'étude du Stade de France a mis en évidence que le contraste sur l'aire de jeu dû à l'ombre de la toiture est une source de gêne visuel pour les spectateurs, les téléspectateurs et aussi les joueurs. Cependant ce contraste peut être atténué par l'emploi de matériaux de couverture de toiture translucides ou opalescents qui diffusent la lumière dans toutes les directions.

Ces résultats permettent de formuler un critère de confort visuel pour les spectateurs : une aire de jeu exempte de contrastes, en d'autres termes une aire de jeu uniformément ensoleillée ou complètement à l'ombre est favorable du point de vue du confort visuel des spectateurs.

Dans les espaces semi-extérieurs l'uniformité de l'éclairagement est plutôt déterminée par le rapport des niveaux d'éclairagement des surfaces qui sont ensoleillées et le niveau d'éclairagement de celles qui sont à l'ombre. Ce rapport peut atteindre 10, par exemple en Europe, où l'éclairagement solaire maximal mesuré sur un plan horizontal peut atteindre 100 000 lux sur un site dégagé, alors que la contribution du ciel est d'environ 10 000 lux si on voit le ciel complet. Il n'existe pas de réglementation concernant le rapport d'éclairagement entre une zone ensoleillée et une zone à l'ombre en lumière du jour dans les stades, cependant on estime qu'un rapport d'environ 4 correspond à des conditions lumineuses relativement uniformes avec des contrastes atténués.

Concernant les aspects du confort thermique des spectateurs, dans certains climats il n'est pas souhaitable que les spectateurs soient exposés au soleil surtout pendant la période estivale. Par contre, dans les climats froids une toiture transparente paraît une solution qui favorise le confort thermique des spectateurs.

Sous une toiture transparente les spectateurs sont exposés au rayonnement direct réduit, tandis qu'une toiture translucide transmet encore moins du rayonnement direct, car elle le diffuse principalement. La toiture opaque fournit l'ombre la plus forte, en revanche quand elle est réchauffée par le rayonnement solaire direct, elle suscite une augmentation importante de la température radiante moyenne au niveau des tribunes. En conséquence, les spectateurs placés en haut des tribunes, qui voient la toiture sous un angle solide très important, subissent des conditions très inconfortables pendant les périodes chaudes. Ces conditions sont d'autant plus sévères s'il n'existe pas d'ouverture entre la tribune et la toiture qui permettrait la circulation de l'air entre la toiture et les gradins [Fiala *et al.*, 1999].

2.4 APPROCHE DU CONFORT ACOUSTIQUE DANS LES STADES

Les stades ont hérité leur multifonctionnalité des amphithéâtres romains. Tandis que les amphithéâtres romains ont accueilli des batailles navales et des spectacles de tauromachie, les stades modernes accueillent des spectacles divers : différents jeux de balle (exemple : football, rugby), des compétitions (exemple : athlétisme), des concerts, des rassemblements religieux etc. Ces différentes sortes de spectacles exigent différentes ambiances acoustiques.

La notion de confort acoustique ne peut pas être dissociée de **l'intelligibilité de la parole** venant des haut-parleurs. Du point de vue des spectateurs, le confort acoustique signifie une ambiance sonore agréable au niveau des tribunes qui permet de profiter pleinement de l'événement sportif, musical etc.

L'ambiance sonore est donnée par la forme géométrique environnant les spectateurs et les matériaux utilisés. Dans le cas d'un stade de football une bonne ambiance sonore serait celle qui permettrait aux spectateurs d'entendre la voix des autres spectateurs qui supportent la même équipe en créant une ambiance "effervescente", c'est-à-dire ni trop réverbérante pour ne pas avoir trop de problème d'intelligibilité, ni trop sèche pour favoriser la "communion" entre spectateurs. Cependant, pour un concert classique une ambiance sonore complètement différente serait préférable avec un temps de réverbération moins important.

De plus, l'aspect de l'intelligibilité est lié non seulement à l'ambiance sonore ressentie par les spectateurs mais encore à **la sécurité**. Une annonce par exemple qui signale l'évacuation du stade en cas d'urgence doit être dans tous les cas intelligible.

L'aspect de sécurité s'oppose ainsi à l'ambiance "effervescente" demandé par la majorité des spectateurs de football [Martin 2005, comm. pers.]. Ceci a été également évoqué par Patel [Patel 2004, comm. pers.] du bureau d'étude ARUP qui a analysé l'ambiance acoustique du nouveau Stade de Manchester.

L'intelligibilité de la parole venant des haut-parleurs est caractérisée par les indices suivants :

- le TR, le temps de réverbération → l'EDT, Early Decay Time ou temps de réverbération initial;
- le STI, Speech Transmission Index (ou sa forme simplifiée, le RASTI).

Le TR exprime la durée qui correspond à l'atténuation du son de 60 dB après l'extinction d'une source sonore (Figure 51).

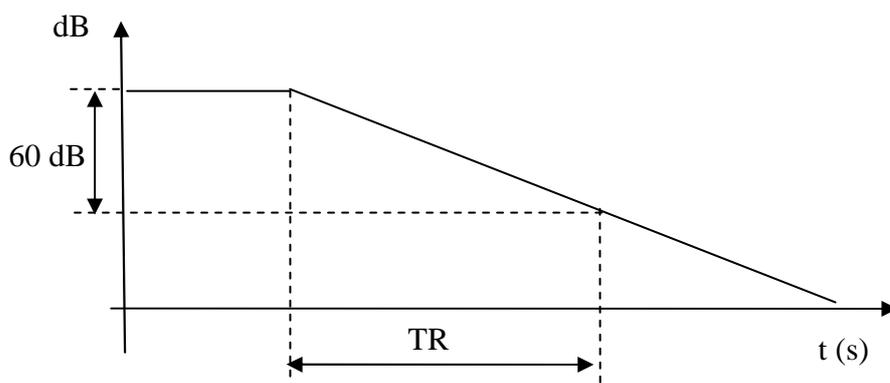


Figure 51 : Définition du temps de réverbération

La réponse impulsionnelle dépend du volume, de la géométrie et des matériaux de l'espace où le son est propagé. La Figure 52 montre un exemple de réponse impulsionnelle. On caractérise l'influence d'un volume par sa réponse impulsionnelle (réponse du volume entre un point source et d'un point récepteur à une impulsion infiniment brève émise par la source à l'instant $t=0$).

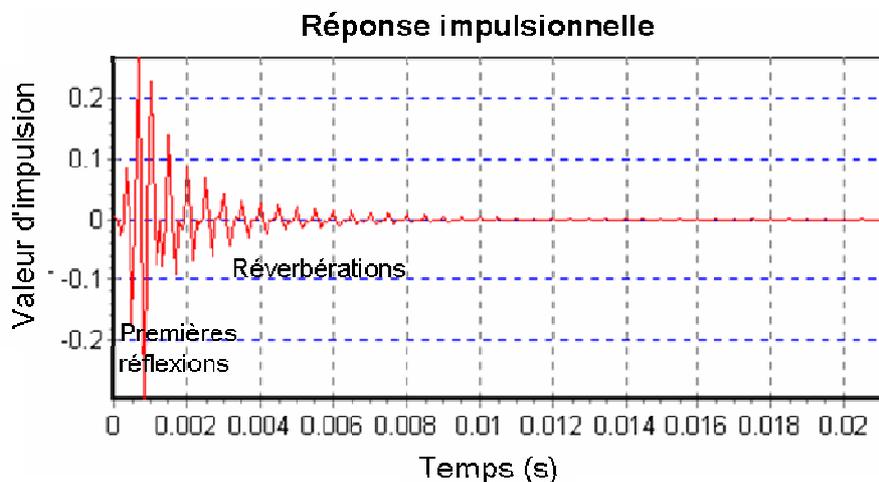


Figure 52 : Réponse impulsionnelle

Cette technique de caractérisation d'un volume par sa réponse impulsionnelle a été développée pour l'acoustique des salles. De nombreux critères de qualité objective sont calculés à partir de cette réponse impulsionnelle. Dans un stade la réponse impulsionnelle est évidemment très différentes de celle d'une salle des spectacles (volume ouvert) et les critères habituellement utilisés ne peuvent pas être transposés directement.

Le temps de réverbération est d'environ 0,8 seconde dans un théâtre, et 5-6 secondes dans une église. Dans le stade de Montréal avant de traitement acoustique le TR atteignait à 21 secondes selon l'emplacement! [Martin 2005, comm. pers.]

Le STI prend une valeur entre 0 et 1. Plus il est proche de 1, plus la parole venant des haut-parleurs est compréhensible. Tandis que lorsque la valeur est proche de 0, la parole ne peut pas être bien comprise. Le STI est calculé à partir de la réponse impulsionnelle.

Le public dans un stade absorbe le son complètement.

La toiture d'un stade protège le milieu extérieur du son qui est produit dans le stade, d'ailleurs la nuisance sonore due au son produit par les usagers du stade au cours des événements, en particulier des événements de caractère musicale présente le sujet des études menées dans le domaine d'acoustique dans les stades [Chase *et al.*, 1995].

Selon Patel [Patel 2004, comm. pers.] la qualité acoustique globale d'un stade dépend moins de la forme architecturale que du traitement des surfaces.

Dans les **stades anciens** les tribunes présentaient des pentes plus raides que celles des stades modernes. En conséquence dans les stades anciens la toiture est plus éloignée des spectateurs. Le son produit par les spectateurs est propagé directement vers l'aire de jeu et pas vers la toiture. Ainsi pratiquement aucun son venant des tribunes n'est pas réfléchi par la toiture. L'absence de réflexion du son par la toiture émis par les spectateurs, conduit à une ambiance sans effervescence qui ne traduit pas l'excitation et les sensations de la foule.

Dans les **stades modernes**, la pente des tribunes est moins importante, en conséquence la toiture est moins éloignée des gradins. Ainsi, la toiture réfléchit le son vers les niveaux bas des gradins et vers l'aire de jeu. **La forme de la toiture contribue de la distribution du son depuis les spectateurs vers l'aire de jeu.** De ce point de vue les toitures de forme légèrement incurvée, concave, convexe et plate sont bénéfiques lorsqu'elles sont couvertes par des matériaux durs comme le métal ou le verre qui réfléchissent bien le son.

Les matériaux plus légers ne sont pas à retenir pour les raisons suivantes :

- Le polycarbonate ou les couvertures métalliques sans isolation peuvent être très bruyants lorsqu'il pleut. Ceci est très désagréable surtout si le stade est éventuellement utilisé pour des concerts.
- Les matériaux comme le PTFE ou le ETFE sont transparents du point de vue acoustique. Cela signifie que le son incident s'échappe par la toiture vers l'extérieur. Ce phénomène peut être une raison du manque "d'effervescence" à l'origine d'une bonne ambiance de foule.

Les critères acoustiques sont liés à l'aspect de **sécurité**, en particulier **l'évacuation en cas d'urgence**. La conception acoustique de ces espaces est extrêmement complexe et signifie un défi pour les ingénieurs d'acoustique. Selon Marsh [Marsh 2005, comm. pers.] "le confort acoustique" est plus fortement lié à l'intelligibilité de la parole. C'est pourquoi il recommande de concevoir un système électroacoustique constitué de haut-parleurs distribués d'une façon dense. La distance entre les haut-parleurs et les gradins est au maximum de 24 à 30 mètres.

Les normes internationales concernant la sécurité (exemple : IEC 608049; 1998) exigent que les stades possèdent un système d'alarme sonore. Il est donc nécessaire d'assurer que la parole venant des haut-parleurs soit bien entendue par les spectateurs en cas d'urgence. Afin d'atteindre le niveau d'intelligibilité exigé dans les normes internationales, un système sonore nécessite un bilan soigneux quant au type, à l'orientation et l'emplacement des haut-parleurs et requiert aussi le contrôle de la réverbération et de la réflexion du son dans le stade. Ceci affecte la forme du stade et le choix de matériaux.

Les normes internationales et nationales exigent le contrôle de l'émission du son depuis le stade vers son environnement. La limite sonore varie selon la catégorie de l'événement : ainsi les limites définies pour les événements sportifs diffèrent de celles définies pour des concerts. Ces exigences affectent fortement le choix du site d'implantation du stade, l'orientation du bâtiment et le design de la toiture.

La toiture fonctionne comme une barrière qui retient le son dans l'enceinte du stade en limitant la charge sonore des bâtiments environnants.

Certains phénomènes acoustiques sont liés aux caractéristiques climatiques : l'humidité relative et la température. Cependant ces paramètres climatiques ne peuvent pas être directement affectés par la morphologie du stade. Le son est propagé plus rapidement si la température est élevée et moins rapidement si celle-ci est basse [Marsh 2005, comm. pers.]. L'air absorbe le son en fonction de la fréquence de celui-ci et de l'humidité relative de l'air.

Ces aspects créant une relation complexe sont tous fondamentaux pour un niveau d'ambiance sonore acceptable dans le sens le plus large. Il n'existe pas de solution qui réponde à la fois à tous ces critères. Les solutions dépendent du bâtiment lui-même, du site et de l'environnement [Patel 2004, comm. pers.].

3. CONCLUSION – HYPOTHESES DU TRAVAIL

L'étude bibliographique sur l'histoire et la morphologie des stades a mis en évidence que la morphologie du stade affectent principalement les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes. Les conditions thermiques sont également affectées par la morphologie et par le choix des matériaux, mais dans une mesure moins large que les conditions aérauliques.

Afin d'étudier la relation entre l'ambiance climatique dans le stade et sa morphologie, il est nécessaire de classier les stades contemporains en fonction de leurs caractéristiques morphologies et choisir les classes qui présentent un intérêt pour les études suivantes. Ces classes serviront comme sujets des essais paramétriques menés sur une maquette à géométrie variable qui permettra d'étudier les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes. Ainsi la première hypothèse est basée sur la morphologie :

- Les stades modernes classifiés en **grandes familles morphologiques** peuvent être caractérisés par des indices adimensionnels issus des différentes données géométriques et de leurs proportions : l'inclinaison de la toiture, la porosité de la façade, la proportion de la grande diagonale et la hauteur du stade [Szucs, 2004(2)].

L'étude bibliographique sur le confort au vent et le confort thermique en espace extérieur et semi extérieur a démontré qu'outre la recherche qui se focalise principalement sur les aspects de sécurité au vent, de nombreuses études ont été menées dans le domaine du confort au vent. Les résultats de ces recherches ont été adaptés également aux stades, ce qui a mené à la réalisation d'analyses de **confort au vent** des spectateurs à partir d'un critère basé sur l'effet mécanique du vent [Moreau, 2002(1)].

Si de nombreuses études ont été faites dans le domaine du confort thermique, le nombre de celles qui portent sur le confort thermique en espaces extérieurs est réduit, et celles qui traitent spécifiquement des stades sont encore moins nombreuses. La majorité des études menées sur le confort dans les stades se rapportent à des équipements particuliers localisés dans des sites géographiques bien définis. Dans ces études l'analyse du **confort thermique** concerne uniquement une période de courte durée ou une journée type [Fiala *et al.*, 1999] ou une heure d'une journée définie [Bouyer, 2004]. Cependant, des méthodes qui permettraient d'analyser de manière simple non seulement le confort au vent, mais aussi l'ensemble du confort au vent et du confort thermique, en d'autres termes le **confort aérothermique** des spectateurs dans les stades pour des périodes plus longues ou pour l'intégralité d'une saison ne sont pas encore connues. Ainsi l'hypothèse suivante s'articule autour d'un système de critères uniforme qui intègre non seulement l'effet mécanique du vent, mais aussi l'effet du vent et des autres paramètres climatiques, en particulier celui de la température et du rayonnement sur le confort thermique des spectateurs :

- Les critères du confort au vent et du confort thermique peuvent être intégrés dans un système commun, ce qui forme une **zone de confort composée** de ces critères [Szucs *et al.*, 2005(3)].

L'analyse du confort au vent des stades étudiés au CSTB Nantes a été faite à partir du critère de gêne mécanique par l'emploi de l'indice Ψ . Cet indice exprime la vitesse moyenne du vent et son écart type en un point du stade par rapport à ceux d'un point de référence [Gandemer et Guyot, 1976]. L'indice Ψ sert à caractériser l'écoulement du point de vue des conditions moyennes et "extrêmes" pour les configurations du stade étudiées au cours des essais paramétriques :

- Les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes peuvent être décrites par les différentes formes (ou variantes) de l'indice adimensionnel Ψ , notamment par la valeur moyenne de Ψ ($\overline{\Psi}$), par le premier décile de Ψ ($\Psi_{10\%}$) et par le dernier décile de Ψ ($\Psi_{90\%}$). Ces indices correspondent à chaque configuration, et à chaque incidence du vent pour lesquelles la maquette du stade a été testée. Ils décrivent les conditions aérauliques dans les zones fortement ventilées, dans les zones de calme de vent et également les conditions aérauliques moyennes qui concernent l'intégralité des gradins. Ils permettent également de déterminer l'**homogénéité** de l'écoulement.

Les études menées en soufflerie sur des stades particuliers situés en des localisations géographiques bien définies laissent supposer qu'il peut exister des relations entre certaines caractéristiques morphologies du stade et certaines variations de l'indice Ψ . Donc l'hypothèse suivante se formule de la façon suivante :

- Il existe des **corrélations** entre les caractéristiques morphologiques du stade et les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes qui sont décrites par les différentes formes de l'indice adimensionnel Ψ .

Les résultats des essais paramétriques menés sur la maquette à géométrie variable sont adimensionnés par la vitesse moyenne et l'écart type au point de référence. Les corrélations entre les paramètres morphologiques et les caractéristiques de l'écoulement permettent d'interpoler les résultats à des configurations possédant des caractéristiques morphologiques dans l'intervalle des gammes testées.

- Les variations de l'indice Ψ qui caractérisent l'écoulement au niveau des tribunes des différentes configurations sont **transposables aux cas réels**. Les valeurs adimensionnelles des différentes formes de l'indice Ψ sont interpolées pour les incidences du vent, et pour les variantes de caractéristiques morphologiques non mesurées (dans l'intervalle des gammes étudiées). Les fréquences d'occurrence de valeurs seuils de vitesse sont calculées à partir des données météorologiques du site d'implantation du stade. Ces valeurs associées à la zone de confort permettent de définir la période de confort aérothermique sur la durée totale d'utilisation. Elles permettent également de calculer la durée des périodes d'inconfort (de différents types).

Outre le confort thermique, les caractéristiques climatiques, en particulier le rayonnement solaire affecte également le confort visuel des spectateurs. Le confort visuel dans les stades en lumière du jour est un champ peu exploré. Cependant il existe un critère concernant le confort visuel des spectateurs et des téléspectateurs selon lequel il faut éviter le contraste dû à l'ombre portée de la toiture projetée sur l'aire de jeu ensoleillée [Garcia *et al.*, 1997]. Ce critère est supposé être satisfait par l'utilisation de couvertures composées de matériaux de différentes caractéristiques photométriques. Peu d'exemples sont connus qui illustrent ce concept.

- La **morphologie** du stade, et en particulier celle de la toiture et l'orientation du bâtiment, affecte des conditions **lumineuses en lumière du jour** au niveau de l'aire de jeu. En conséquence la morphologie et l'orientation ont un impact sur le confort visuel des spectateurs dans un stade d'un site bien défini.
- Les couvertures modernes transparentes, translucides ou opaques de toiture permettent l'adaptation de l'ambiance visuelle aux exigences de confort visuel. Les **caractéristiques photométriques** de la couverture de toiture peuvent être définies d'une part à partir de la morphologie du stade et d'autre part à partir de sa position géographique, notamment de la course du soleil [Szucs *et al.*, 2005(3)].

Les critères de confort thermique et de confort visuel sont liés au travers de l'échange par rayonnement. En conséquence, les exigences de confort aérothermiques doivent être confrontées à celles du confort visuel, ce qui permet éventuellement de trouver un compromis entre ces deux sortes de critères.

Les exigences concernant l'ambiance acoustique dans les stades du point de vue d'intelligibilité et du point de vue de "l'ambiance effervescente du match" semblent opposées [Patel 2004, comm. pers.]. C'est pourquoi un système unifié de critères acoustiques ne s'est pas encore développé. De plus, tandis que entre des critères de confort thermique et de confort visuel il existe une interaction complexe, entre ces critères et ceux-ci de l'acoustique l'existence de ce genre de relation n'était pas encore démontrée. Il y a cependant une relation dans la mesure où la qualité acoustique est également liée à la morphologie.

Les tribunes et la toiture créent un espace non seulement d'un sens géométrique qui détermine l'image architecturale du stade, mais encore une micro ambiance de qualité visuelle, aérothermique et acoustique qui la distingue de l'environnement entourant.

CHAPITRE II.

OUTILS EXPERIMENTAUX, CHOIX DES CONFIGURATIONS POUR LES ESSAIS PARAMETRIQUES EN SOUFFLERIE, METHODE D'ANALYSE DES RESULTATS

L'objectif de cette étude est de développer une approche méthodologique qui permet d'évaluer le confort aérothermique des spectateurs. Ce chapitre vise donc

- *à choisir les paramètres climatiques qui influencent le confort aérothermique des spectateurs et à définir une zone de confort aérothermique délimitée par les critères thermiques et mécaniques;*
 - *à classifier les stades modernes afin de choisir des configurations de stade pour les essais paramétriques;*
 - *à détailler la méthode d'analyse statistique des résultats;*
 - *à présenter les outils expérimentaux : la soufflerie et l'horizontoscope.*
-

1. CONCEPTION DE LA ZONE DE CONFORT THERMIQUE COMPOSEE DE LIMITES DU CARACTERE THERMIQUE ET MECANIQUE

Selon la classification de Spagnolo [Spagnolo *et al.*, 2003] les stades constituent des **espaces semi-extérieurs** en raison du fait qu'ils sont à la fois ouverts et couverts. Ils contiennent des éléments qui permettent une protection des usagers contre les conditions climatiques extérieures – par exemple une paroi, qui fonctionne comme écran brise vent ou une toiture qui protège les spectateurs du soleil, des précipitations et également du vent. Ces espaces semi-extérieurs modifient les **facteurs climatiques**. **Parmi eux, outre le rayonnement solaire, c'est le vent, qui peut être modifié le plus largement par l'architecture du stade.** En conséquence, il est nécessaire de tenir compte du plus grand nombre

de paramètres climatiques possibles pour l'évaluation du confort des spectateurs. Dans cet esprit une zone de confort est proposée qui intègre les variables climatiques extérieurs, en particulier le vent et la température.

La zone de confort composée des limites du caractère thermique et mécanique est basée sur le nouvel indice de refroidissement éolien (new Wind Chill Index), la charte bioclimatique révisée par Arens [Arens *et al.*, 1986] et la méthode d'évaluation de confort du vent employé au CSTB Nantes.

Elle indique les vitesses du vent admissibles et/ou nécessaires au maintien du confort thermique en fonction de température (Température de Bulbe Sec) pour une valeur de l'humidité relative de 60%. La Figure 53 illustre les limites de trois types de zone de confort intégrée:

- **Limite de gêne mécanique de 3.6 m/s** : 3 m/s vitesse moyenne et son écart-type de 20%. Cette valeur a été introduite par le CSTB Nantes. Selon l'échelle Beaufort cette valeur est associée aux premiers événements d'inconfort : "Les visages ressentent la sensation du vent. Les feuilles bruissent. Les cheveux sont dérangés." [Gandemer et Guyot, 1976]. "La notion de confort est à dissocier de celle de sécurité : le seuil de danger qui correspond à la force qui tend à jeter à terre un être humain est entièrement basé sur des considérations mécaniques et aérodynamiques (maître couple, poids, position etc.) et correspond en général à des vitesses moyennes de l'ordre de 15 m/s." [Gandemer et Guyot, 1976].
- **Limite maximale** qui correspond à la vitesse admissible pour les températures basses - inférieures à $\sim 10^{\circ}\text{C}$ - d'après la conception du nouvel indice de refroidissement éolien (new Wind Chill Index);
- **Limite minimale** qui indique la vitesse de l'air nécessaire au maintien du confort thermique pour les températures hautes - supérieures à $\sim 26^{\circ}\text{C}$. La limite maximale a été déterminée à partir la charte bioclimatique révisée par Arens et al. [Arens *et al.*, 1986]. Ce dernier illustre l'effet refroidissant du vent. Toutefois, en raison des phénomènes mécaniques évoqués précédemment la vitesse d'air ne peut dépasser le seuil de 3.6 m/s.

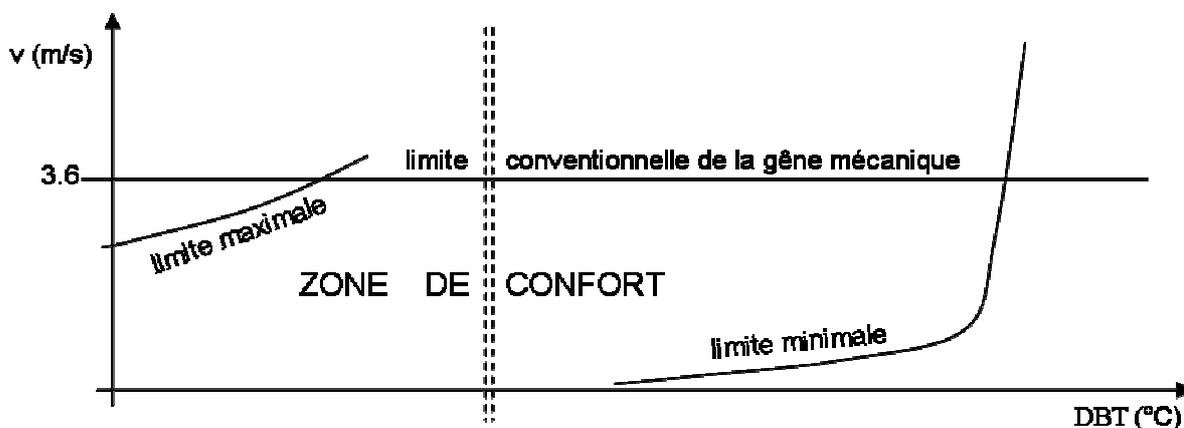


Figure 53 : Conception de la zone de confort

La zone de confort – illustrée par la Figure 53 – est balisée par ces limites qui sont décalées quand du rayonnement additionnel de grande ou courte longueur d'onde est présent. Le gain ou perte due au rayonnement peut être exprimé par le Champ Effective de Rayonnement (Effective Radiant Field, ERF) [Arens 2004, comm. pers.] quand la température des surfaces environnantes diffère de celles d'air.

L'effet refroidissant du vent peut être également modifié par le rayonnement, néanmoins dans un premier temps seule l'interaction de la température et du vent est étudiée en utilisant l'indice de refroidissement éolien (WCI).

Le terme *vent* signifie la vitesse moyenne et son écart type, car la vitesse moyenne et sa composante fluctuante affectent également le confort thermique et le confort "mécanique" [Gandemer et Guyot, 1976] – en un mot le confort "aérothermique – de l'individu. Ces deux composantes doivent être prises en compte lorsqu'on décrit l'effet de morphologie sur l'écoulement d'air dans le stade, en particulier au niveau des tribunes car les deux affectent le confort aérothermique des spectateurs [Chapitre I.2.2].

1.1 LIMITE DE MOUVEMENT D'AIR ASSOCIEE AUX BASSES TEMPERATURES EXTERIEURES

Le nouvel indice de refroidissement éolien (new WCI et WCT) est la mesure de l'effet refroidissant du vent sur la peau exposée [Auliciems *et al.*, 1997]. La température de l'air ne peut pas être perçue directement par les individus. Ils ressentiront la température de leur peau. Cette dernière varie entre autres en fonction de la vitesse du vent. En conséquence, en présence du vent les échanges convectifs et évaporatoires sont intensifiés et la température perçue est inférieure à la température réelle (DBT).

La version précédente de l'indice de refroidissement éolien a été améliorée sur plusieurs aspects : entre autres elle intègre la vitesse du vent calculée à la hauteur moyenne du visage humain (environ 1.5 mètres) au lieu de la hauteur standard de l'anémomètre de 10 mètres. Cette version intègre une théorie moderne de transfert de la chaleur en ce qui concerne la chaleur perdue/dissipée par le corps humain dans son environnement.

La Figure 54 illustre l'effet refroidissant du vent calculé par le nouvel indice de refroidissement éolien, pour les températures extérieures de -20°C à +10°C et pour les vitesses du vent jusqu'à 10 m/s. L'effet refroidissant du vent est caractérisé par la différence entre la température ressentie et la température réelle (DBT). Il est marqué en ordonnée du graphe.

L'indice de refroidissement éolien n'a pas de sens réel pour les vitesses inférieures à 2.5 m/s.

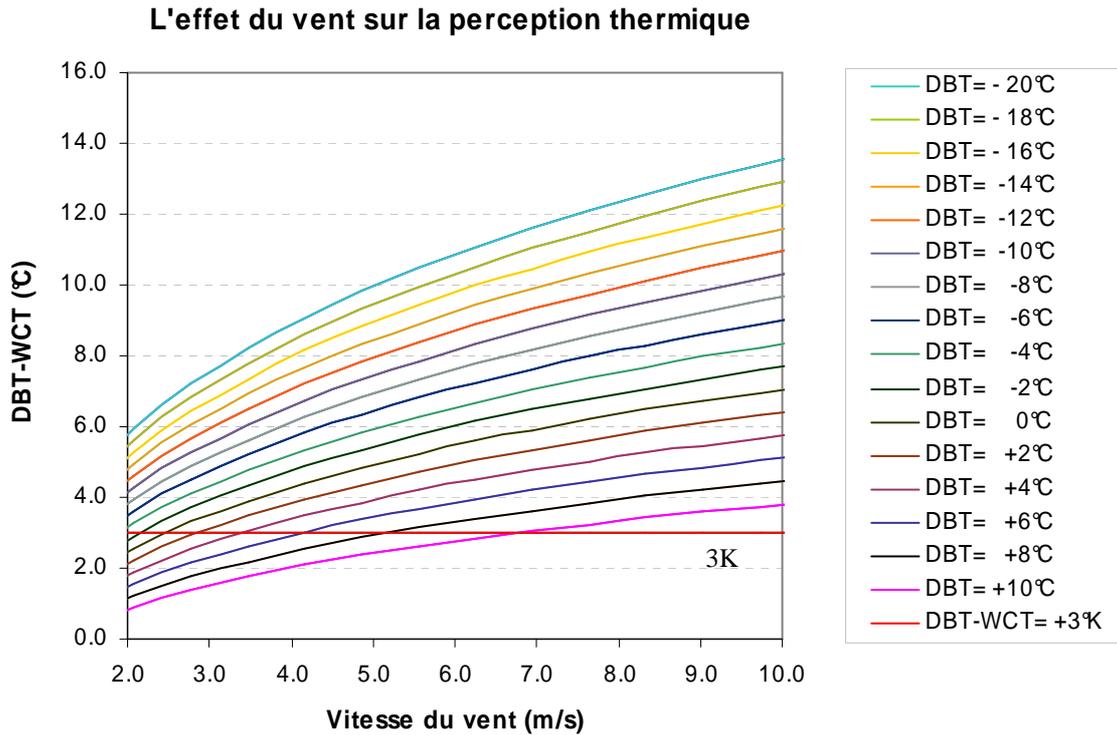


Figure 54 : Différence entre la température ambiante (DBT) et la température ressentie (WCT) en fonction de température ambiante et la vitesse du vent en situation froide

Quand on évalue le confort aérothermique des spectateurs dans le stade, une valeur conventionnelle de 3K est introduite qui définit la différence admissible entre la température extérieure/réelle (DBT) et la température ressentie (WCT). Cette différence est d'une part, une valeur basée sur la tolérance thermique des individus en extérieur et d'autre part, compensable en mettant un pull-over ou en veste [Weber *et al.*, 1995]. On détermine ainsi, les vitesses du vent tolérables associées aux températures basses.

La Figure 55 illustre la vitesse maximale de la zone de confort aérothermique correspondant à la limite "mécanique" de 3.6 m/s. Dans en premier temps seuls les effets du vent et la température sont pris en compte. La courbe de limite maximale est définie en employant le nouvel indice de refroidissement éolien et la valeur conventionnelle de 3K de la différence admissible entre la température extérieure/réelle (DBT) et la température ressentie (WCT).

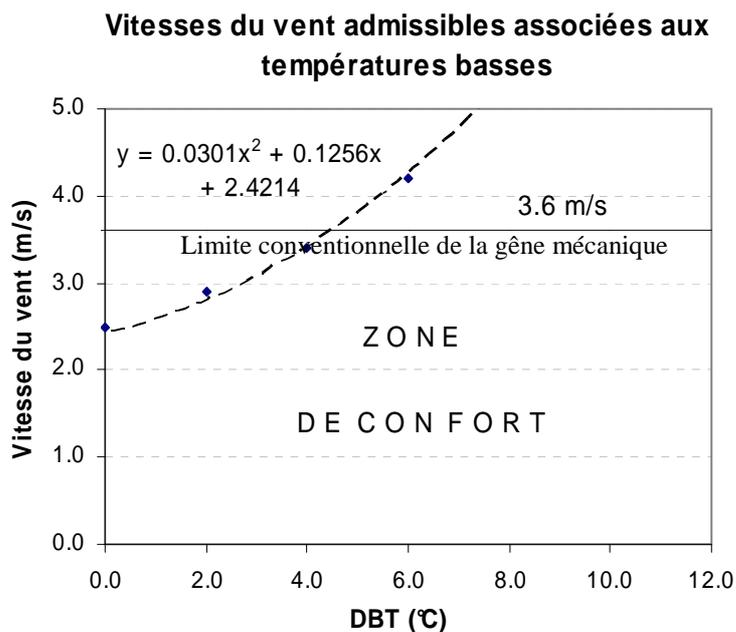


Figure 55 : Vitesses admissibles correspondantes aux températures basses déterminées à partir la conception nouvelle de refroidissement éolien

La courbe montre que la vitesse admissible augmente avec la température, cependant la vitesse du vent ne doit pas dépasser le seuil "mécanique" (ou "dynamique") de 3.6 m/s. Pour les températures inférieures à 4°C le seuil du confort aérothermique est inférieur au seuil "mécanique" de 3.6 m/s.

D'après Arens *et al.* si un rayonnement additionnel (gain) est présent, il compense les températures basses et l'effet refroidissant du vent. En conséquence, la limite maximale de zone se déplace vers les températures basses.

1.2 LIMITE DE MOUVEMENT DE L'AIR ASSOCIEE AUX HAUTES TEMPERATURES EXTERIEURES

La carte bioclimatique révisée par Arens *et al.* présentée sur la Figure 56 intègre l'effet de chaque paramètre climatique séparément qui modifie le confort aérothermique des individus en espace extérieur. La base de la carte est l'indice de confort DISC (Indice d'Inconfort) calculé par le modèle de système thermorégulateur de deux nœuds de Pierce J. B. Le DISC dépend de la température de peau en conditions froides et uniquement de la sueur de peau en conditions chaudes.

A partir des résultats obtenus par l'indice DISC une zone de confort est balisée sur la carte bioclimatique. Dans la zone de confort la température égale à la température radiante moyenne. En dehors de la zone de confort la carte comporte des contours qui indiquent des niveaux de rayonnement, de vitesse du vent et d'humidification nécessaire au rétablissement du confort

aérothermique. Le rayonnement additionnel compense les températures basses et le mouvement d'air contrebalance l'effet des températures élevées.

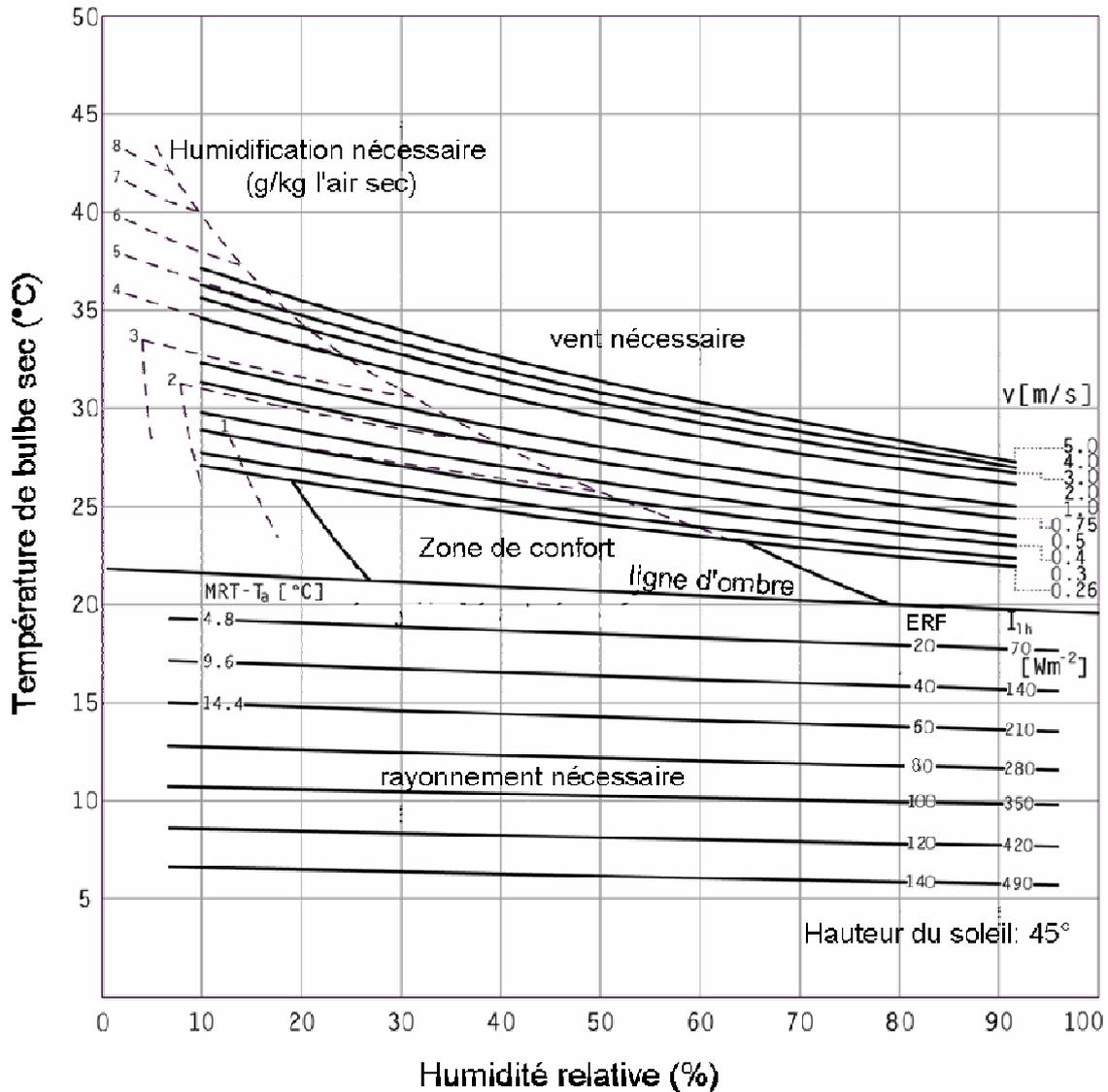


Figure 56 : Carte bioclimatique révisée par Arens *et al.* [Arens *et al.*, 1986]

La zone de confort révisée par Arens *et al.* [Arens *et al.*, 1986] et les résultats de Spagnolo *et al.* [Spagnolo *et al.*, 2003] permettent de définir la limite minimale de zone de confort intégrée en tenant compte uniquement de l'effet de la vitesse du vent et de la température pour une humidité relative définie. Ainsi, pour une humidité relative de 50% la nécessité de mouvement d'air apparaît vers une température de bulbe sec de 26°C (situation de "référence de confort en espace semi extérieure" [Spagnolo *et al.*, 2003]).

La Figure 57 illustre que la limite minimale de la zone de confort aérothermique ne coupe pas l'abscisse, puisque il n'existe pas d'écoulement à vitesse nulle absolue autour de l'individu. La vitesse minimale de l'écoulement dans l'environnement proche du corps de l'individu est environ de 0.2 m/s

[Szokolay, 1980], d'une part due au déplacement ou mouvement de l'individu et d'autre part à la différence de la température ambiante et la température corporelle de l'individu.

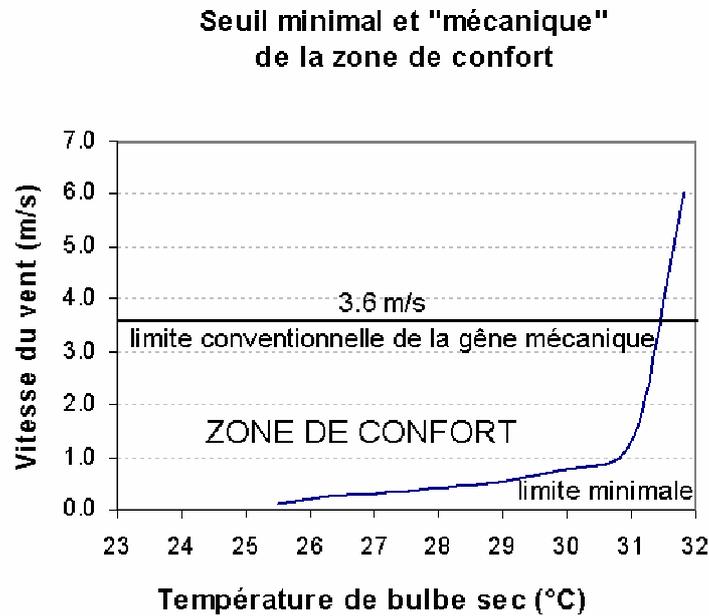


Figure 57 : Seuil minimal et mécanique de zone du confort déterminés à partir la carte bioclimatique révisée par Arens et al. [Arens *et al.*, 1986].

Ainsi, les trois limites de la zone de confort aérothermique illustrées par la Figure 58 sont déterminées. Elles sont ajustables en fonction de variation de l'humidité relative ou du rayonnement.

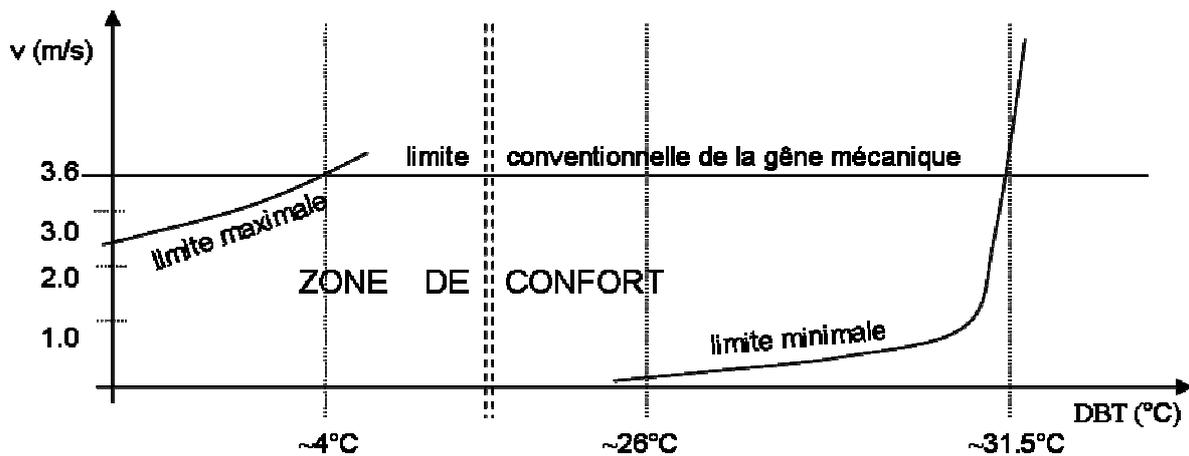


Figure 58 : Conception de la zone de confort aérothermique déterminée sur la base de la carte bioclimatique révisée par Arens *et al.* [Arens *et al.*, 1986], du nouvel indice de refroidissement éolien, et de la méthode utilisée par le CSTB Nantes

1.3 EFFET DU RAYONNEMENT ET DE L'HUMIDITE SUR LE CONFORT THERMIQUE

Les limites de zone de confort aérothermique sont ajustables : quand du rayonnement est présent ou lorsque l'humidité relative varie, les limites se déplacent. L'effet modificateur du rayonnement est exprimé par le champ effectif de rayonnement (Effective Radiant Field, ERF).

La Figure 58 montre qu'en présence de températures importantes et de rayonnement additionnel la limite minimale de la zone est décalée vers les températures moins importantes. Cela signifie, que pour contrebalancer l'effet conjugué du rayonnement et des températures élevées une vitesse du vent plus importante est nécessaire. De même, le rayonnement compense des températures basses, en conséquence la limite maximale se déplace vers les valeurs moins importantes de température en présence du rayonnement.

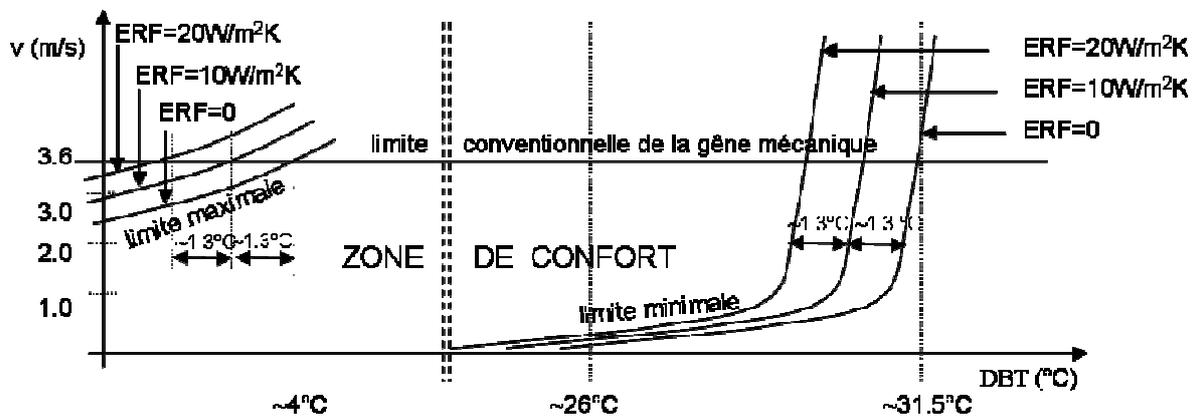


Figure 59 : Limites ajustables de la zone de confort

L'augmentation de l'humidité relative a un effet identique à celui de l'augmentation du rayonnement (ERF) (en ambiance chaude). Une humidité relative importante restreint la perte thermique de l'individu par évaporation, à moins qu'une vitesse d'air suffisamment importante ne maintienne l'évaporation [Auliciems et Szokolay, 1997]. De plus, une vitesse d'air plus importante favorise la dissipation de la chaleur de l'individu par convection pourvu que la température de l'air ne dépasse pas la température du "noyau central" de l'individu qui vaut environ 37°C .

La carte bioclimatique montre qu'environ 10 W/m^2 de ERF compense une différence de température de $\sim 1.3 \text{ K}$. En conséquence, la présence du rayonnement additionnel induit le déplacement des limites de la zone de confort aérothermique (Figure 59).

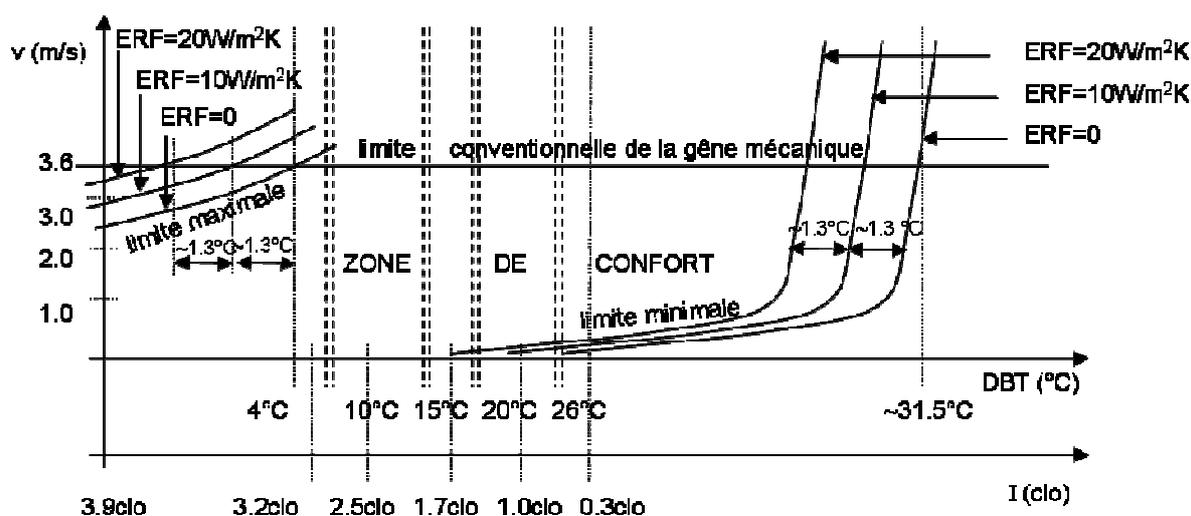
Une augmentation de taux d'humidité relative de 10% suscite une augmentation d'environ 0.6 K dans la température ressentie dans l'intervalle de 50% à 90% de l'humidité relative. Cela signifie que par rapport à l'humidité relative de 50%, l'effet d'une augmentation de 30% de cette dernière est équivalente à une augmentation de température d'environ 1.8 K .

1.4 INTERPRETATION DU CONFORT ET DE L'INCONFORT

La zone de confort suppose un spectateur de référence qui est dans une position assise ayant un niveau métabolique correspondant à l'activité qu'il exerce. Cependant, il est présumé que ce dernier est plus élevé chez les spectateurs qui sont souvent agités pendant les événements sportifs, que celui d'un individu qui est assis dans un état de repos. On suppose ensuite que l'individu est vêtu conformément à la saison et qu'il a la possibilité de compléter son habillement par un vêtement supplémentaire (un pull-over, un veste) de 0.3 clo. On suppose également que conformément à la bienséance, l'individu n'a pas la possibilité de porter de vêtements qui valent moins que 0.3 clo.

La Figure 60 montre la zone de confort aérothermique avec des valeurs indicatives d'habillement pour une activité physique de 1.4 met (vaut environ 80 W/m^2) en fonction de la température. Cette dernière est légèrement supérieure à celle correspondant à un état de repos assis, en raison de l'effet stimulant de l'événement qui se passe dans le stade.

On suppose que dans la zone de confort la température radiante moyenne égale à la température de bulbe sec et l'humidité relative est de 50%.



*Production de chaleur métabolique : ~ 80 W/m²
I : insolation vestimentaire en clo*

Figure 60 : Limites ajustables de la zone de confort intégrée couplées par des valeurs indicatives d'habillement pour une activité physique de 80 W/m^2

Les valeurs indicatives de habillement d'un individu "référence" sur la Figure 60, correspondant à l'activité définie auparavant (1.4 met) et aux différents intervalles de températures ont été déterminées par le calculateur PMV de "P.E.M. Electronic Metahandbook" [Weber *et al.*, 1995]. Le PMV étant un indice applicable dans les espaces intérieurs, les données correspondantes aux températures inférieures à 10°C ont été extrapolées.

Les valeurs de habillement représentent des valeurs maximales, d'autant plus que la Norme ISO 7730 considère le siège comme un isolement vestimentaire supplémentaire de 0.4 clo au maximum [Radunz, 2003].

La majeure partie du corps des spectateurs est "visible" pour les corps humains environnants. En conséquence, les spectateurs ne perdent pratiquement pas de chaleur par rayonnement à partir de ces parties visibles de leurs corps. Au contraire, ils dégagent de la chaleur : plusieurs dizaines de milliers de spectateurs dégagent une quantité de chaleur importante (plusieurs milliers de kilowatts), ce qui a un effet local chauffant, même si une partie de la chaleur dissipée est perdue par convection due au mouvement d'air. Ce phénomène est considéré dans l'évaluation du confort dans les stades, on l'appelle "l'effet pingouin". Le facteur de forme est un critère d'évaluation de la quantité de la chaleur dégagée par les spectateurs.

Afin de pouvoir évaluer le confort aérothermique, il est nécessaire d'abord évaluer l'habillement de l'individu [Soligo *et al.*, 1998]. Toutefois, un niveau d'habillement peut être associé à chaque saison; et les variations climatiques journalières suscitent des modifications journalières également de l'habillement. Les individus ont la possibilité d'enlever ou de compléter leur habillement par des vêtements au cours de la journée ou au cours des événements - dans le contexte des stades ils agit d'un seul vêtement (0.3 clo).

Evidemment, l'habillement varie en fonction de plusieurs paramètres personnels, comme l'age, le sexe, l'acclimatation, le métabolisme etc. Il varie également en fonction des coutumes sociales et de la localisation géographique.

Quant au confort ou à l'inconfort aérothermique les sous-catégories suivantes sont distinguées:

- Inconfort dû uniquement à l'effet mécanique (ou dynamique) du vent : la vitesse du vent dépasse le seuil de 3.6 m/s (zone A sur la Figure 61);
- Inconfort dû à l'effet dynamique du vent et à une température basse sans dépasser le seuil "dynamique" de 3.6 m/s (zone B sur la Figure 61);
- Inconfort simultané dû à l'effet dynamique du vent et à une température basse : la vitesse du vent dépasse le seuil de 3.6 m/s (zone C sur la Figure 61);
- Inconfort thermique dû à une température élevée et à l'absence de mouvement d'air satisfaisant (zone D sur la Figure 61);
- Inconfort simultané dû à l'effet dynamique du vent et à une température élevée : la vitesse du vent dépasse le seuil mécanique de 3.6 m/s, mais son effet refroidissant est insuffisante au maintien de confort thermique. Au-delà d'environ 37°C de température de bulbe sec, le mouvement de l'air augmente la perte de chaleur par évaporation. Cependant il augmente le

gain thermique dû à la convection. Le flux thermique reçu par l'individu est plus important, que celui perdu par évaporation, ce qui suscite de l'inconfort aérothermique. (zone *E* sur la Figure 61).

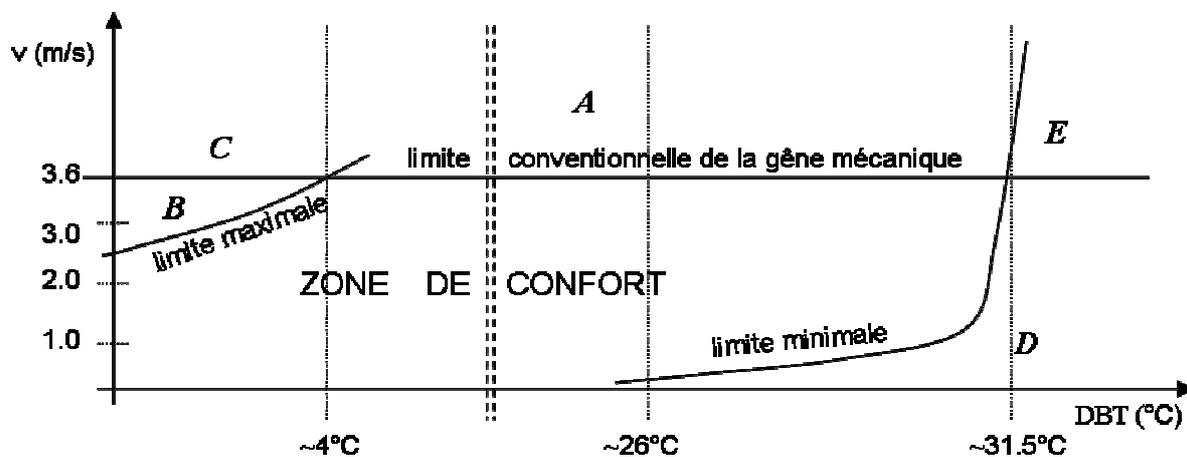


Figure 61 : Zone de confort aérothermique intégrée, joutée par différentes zones d'inconfort aérothermiques marquées par *A*, *B*, *C*, *D* et *E*.

2. CHOIX DES CONFIGURATIONS DE STADE POUR LES ESSAIS PARAMETRIQUES EN SOUFFLERIE

2.1 TYPOLOGIE DES STADES MODERNES

Les stades sont les phares de la ville, bâtiments de prestige qui valorisent l'identité des villes. Ils sont conçus en grand nombre de nos jours. Les compétitions et les Jeux d'Olympiques attirent des spectateurs du monde entier. Certains sports ont des enjeux financiers très importants. Cela nécessite de grandes capacités d'accueil réalisables grâce aux matériaux et aux moyens techniques modernes.

Les technologies audiovisuelles développées permettent que les stades modernes soient multifonctionnels et qu'ils puissent accueillir en plus du sport des spectacles divers.

Toutefois la communication moderne, notamment la télévision permet le suivi des événements sportifs à domicile. Cette dernière ne procure pas autant de sensation aux téléspectateurs, néanmoins il représente une concurrence à laquelle les propriétaires des stades réagissent par un confort et des services amélioré (par exemple : écrans géants).

Le confort en terme architectural et morphologique signifie principalement l'emploi de toitures protectrices. Son existence ou non-existence définit en grande partie le confort des spectateurs. Les toitures qui couvrent le stade en entier en créant un dôme protègent le plus des usagers, ceci n'est cependant pas l'objet de la présente recherche qui n'aborde pas non plus les stades possédant des toitures rétractables.

Du point de vue morphologique, les stades modernes ont été regroupés en quatre grandes familles (Tableau 8).

Famille MIYAGI

Les gradins sont continus, la toiture se compose de deux parties. Entre elles le volume de reste ouvert en permettant à l'écoulement de créer un "couloir" d'air, qui peut susciter des conditions climatiques sévères en cas de vents parallèles à l'axe longitudinal du stade. La forme globale de ces stades peut être vue comme le volume coupé du Colisée en imaginant une absence d'enveloppe aux extrémités du stade.



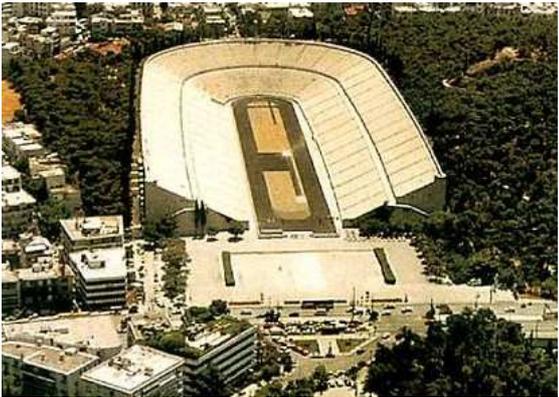
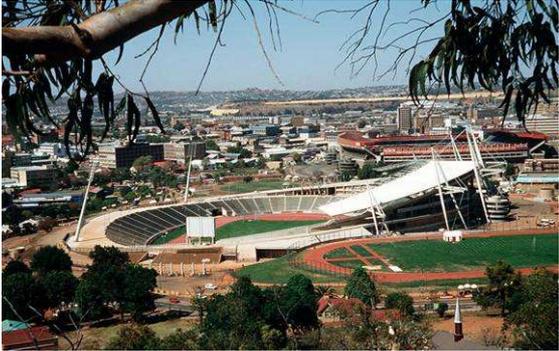
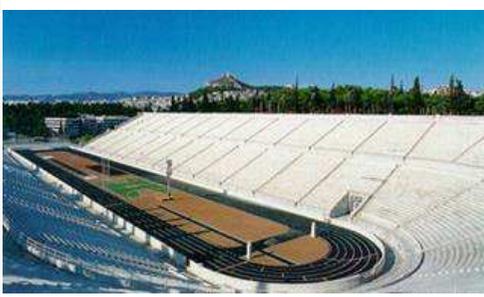
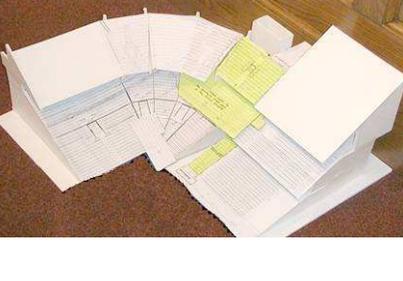
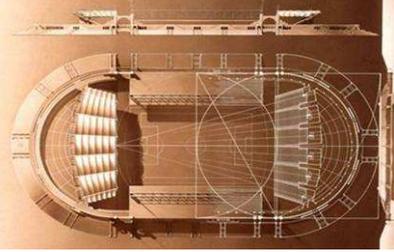
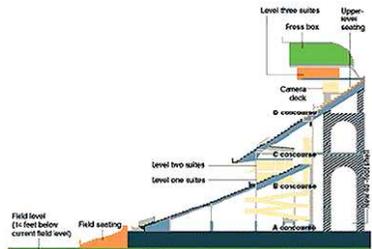
<p style="text-align: center;">Famille ATHENE</p> <p>Cette forme est originaire des anciens stades grecs d'athlétisme. Il est complètement ouvert à l'une des extrémités, ce qui permet l'irrigation libre des gradins et de la piste par les vents parallèles à l'axe longitudinal du stade.</p> <p>Les proportions des arènes dans les stades modernes ont changé par rapport aux stades anciens en raison de l'intégration de l'aire de jeux de football au centre d'une piste d'athlétisme: les arènes modernes sont devenues plus larges et plus courtes que les anciennes.</p>	
<p style="text-align: center;">Famille JOHANNESBURG</p> <p>Cette famille est dérivée de la famille type MIYAGI par l'enlèvement de l'une des deux toitures. Les gradins continus sont combinés à une toiture conçue pour ne protéger qu'un seul côté du stade. Une grande partie des gradins et de l'arène restent directement exposés aux paramètres climatiques. A cause de cette protection partielle on attend des conditions aérodynamiques hétérogènes au niveau des tribunes.</p>	
<p style="text-align: center;">Famille STADE DE FRANCE</p> <p>Les gradins et la toiture forment un volume global compact qui peut être interrompu par des brèches structurelles verticales ou horizontales régulièrement réparties - due à des raisons de sécurité, climatiques ou esthétiques. En conséquence, les conditions aérodynamiques sont supposées être homogènes au sein du stade. Le volume lui-même peut être vu comme l'interprétation moderne du Colisée.</p>	

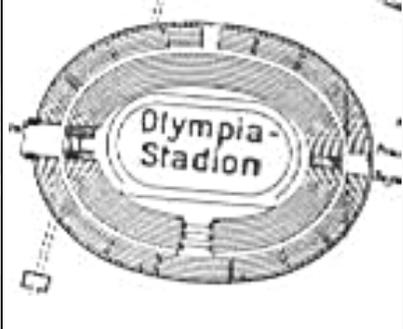
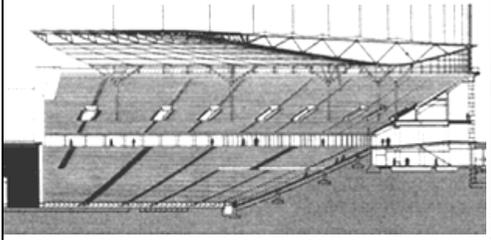
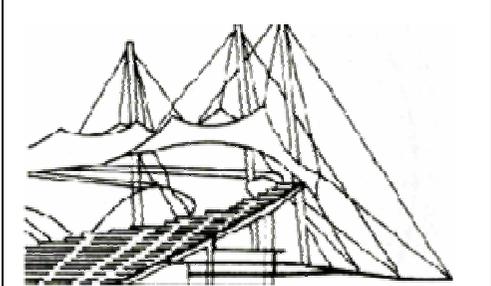
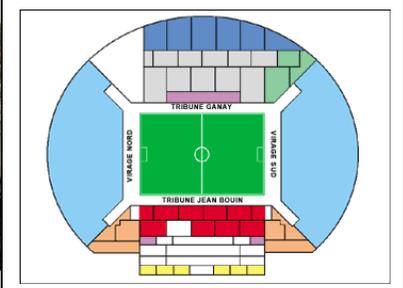
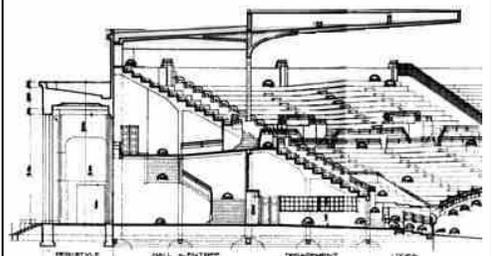
Tableau 8 : Grandes familles des stades modernes

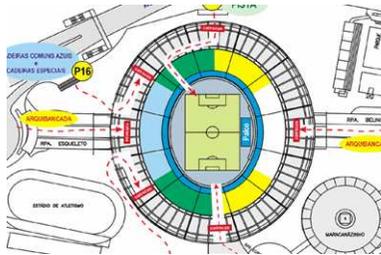
Le tableau suivant (Tableau 9) intègre les stades de toutes les grandes familles. On observe par les exemples présentés les **caractéristiques morphologiques** et **climatiques** des stades, **qui modifient** l'ambiance climatique au sein du stade, en particulier **l'écoulement de l'air**.

Cette synthèse sert à définir les configurations architecturales, qui représenteront les sujets des études paramétriques à mener en soufflerie à couche limite.

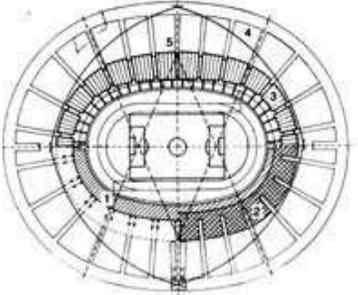
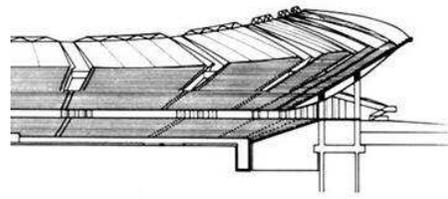
VUE GLOBALE	PLAN/ VUE AÉRIENNE	COUPE/ MAQUETTE/VUE INTÉRIEURE	DÉTAIL	CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES / NOTE
STADE PANATHENAIC (C.A. 330-329 BC) ATHÈNES GRÈCE ~50 000 PLACES ARCHITECTE DE RESTAURATION (XIX. SIÈCLE) : G. AVEROF				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de forme "U" d'athlétisme famille Athènes; - L'axe longitudinal du stade est orienté nord-sud; - Pas de protection solaire en forme de toiture protectrice.
STADE STAMFORD BRIDGE (1977) CHELSEA ROYAUME-UNI ~42 000 PLACES ARCHITECTE : A. LEITCH				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de football, type "anglais" avec une toiture qui couvre les gradins entièrement; - Les virages sont fermés par des écrans qui protègent contre la pluie et le vent.
STADE OLD TRAFFORD (1910) MANCHESTER ROYAUME-UNI ~69 000 PLACES ARCHITECTE : A. LEITCH				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de football, type "anglais"; - La toiture est transparente et elle couvre l'intégralité des gradins; - Les angles du stade sont fermés par des écrans qui protègent contre la pluie et le vent.

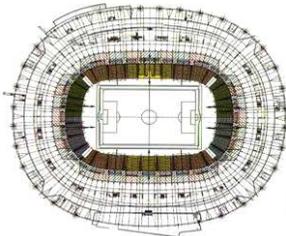
VUE GLOBALE	PLAN/ VUE AÉRIENNE	COUPE/ MAQUETTE/VUE INTÉRIEURE	DÉTAIL	CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES / NOTE
STADE SAN SIRO (1925) - MILAN ITALIE ~85 000 PLACES ARCHITECTES : G. RAGAZZI, E. HOFFER, A. DIAS, P. PAULO				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de football; - Extension: le troisième niveau des gradins et la toiture transparente sont supportés par quatre robustes tours.
STADE DE GERLAND (1920) LYON FRANCE ~43 000 PLACES ARCHITETE : T. GARNIER, R GAGES				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de football, type "anglais" avec une toiture qui couvre l'intégralité des gradins; - Les angles sont ouverts → ils sont des zones potentielles d'apparition de la gêne due au vent.
STADE OHIO (1922) COLUMBUS ÉTATS-UNIS ~101 000 PLACES ARCHITETE : H. D. SMITH				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de forme fer à cheval football, famille Athènes; - Toiture discontinue qui protège seulement la partie haute de la tribune principale; - Pas d'ouverture entre les deux niveaux chevauchés des tribunes.

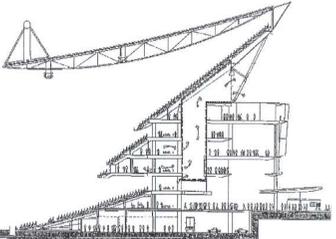
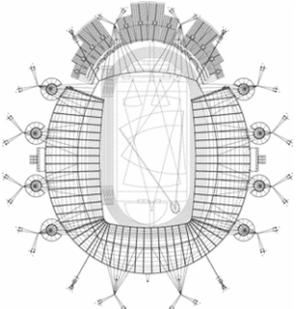
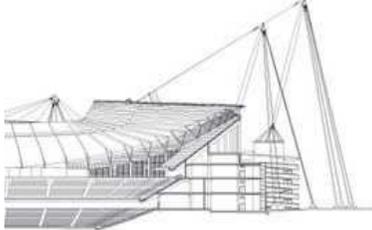
VUE GLOBALE	PLAN/ VUE AÉRIENNE	COUPE/ MAQUETTE/VUE INTÉRIEURE	DÉTAIL	CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES / NOTE
OLYMPIA STADIUM (1936) BERLIN ALLEMAGNE ~70 000 PLACES ALBERT SPEER ARCHITECTE : WERNER MARCH				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de la famille du Stade de France; - Les tribunes de structure béton armé sont divisées en deux niveaux; - La toiture a été ajoutée plus tard (extension).
STADE "OLYMPIC" (1972) MUNICH ALLEMAGNE ~62 000 PLACES ARCHITECTE : G. BENISCH & PARTNER, O. FREI				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de la famille du Stade Johannesburg; - Une membrane tendue couvre la partie ouest des gradins et protège les spectateurs du soleil, des précipitations et du vent
STADE DE VÉLODROME (1937) MARSEILLE FRANCE ~60 000 PLACES ARCHITECTE : J.-P. BUFFI				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de football, type "anglais"; - Toiture discontinue ne protège que la tribune principale (côté ouest).

VUE GLOBALE	PLAN/ VUE AÉRIENNE	COUPE/ MAQUETTE/VUE INTÉRIEURE	DÉTAIL	CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES / NOTE
STADE NOU CAMP (1957) BARCELONA ESPAGNE ~98 800 PLACES ARCHITECTES : L. GARCIA-BARBON, F. M. MIRO, J. S. MAURI				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de tribunes continues - la hauteur du stade varie le long du périmètre; - La structure est en béton armé; La durée d'évacuation du stade est de 5 minutes.
STADE MARACANA (1950) - RIO DE JANEIRO BRÉSIL ~122 000 PLACES ARCHITECTES : R. GALVAO, O. AZEVEDO, A. DIAS, P. PAULO				
				<ul style="list-style-type: none"> - Façade fermée, pas de circulation d'air entre les différents niveaux des tribunes; - Toiture continue qui protège les spectateurs placés en partie haute des gradins.
STADE MORUMBI (1953) - SAO PAULO BRÉSIL ~80 000 PLACES ARCHITECTE : V. ARTIGAS				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade sans toiture; - Plusieurs niveaux de gradins chevauchés; - Les spectateurs placés dans les parties hautes des tribunes basses sont protégés du soleil.

95

VUE GLOBALE	PLAN/ VUE AÉRIENNE	COUPE/ MAQUETTE/VUE INTÉRIEURE	DÉTAIL	CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES / NOTE
STADE SAN NICOLA (1990) BARI ITALIE ~55 000 PLACES ARCHITECTE : R. PIANO				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de la famille du Stade de France; - Les gradins sont séparés par des brèches horizontales et verticales → ventilation intensive; - Une toiture de téflon protège des spectateurs du soleil.
STADE LOUIS FONTENEAU (1984) ~39 500 PLACES NANTES FRANCE ARCHITECTE : B. AGOPYAN				
				<ul style="list-style-type: none"> - Des écrans brise-vent placés le long du périmètre dans la brèche qui se trouve entre la toiture et les gradins. Ces derniers atténuent la ventilation au niveau des tribunes et de l'aire de jeu.
STADE KING FAHD (1980) RIYADH ARABI SAUDITE ~66 000 PLACES ARCHITECTE : I. FRASER, J. ROBERTS & PARTNERS				
				<ul style="list-style-type: none"> - La toiture de toile blanche couvre l'intégralité des gradins; - Grâce aux ouvertures uniformément réparties le long du pourtour du stade, les gradins sont intensivement ventilés.

VUE GLOBALE	PLAN/ VUE AÉRIENNE	COUPE/ MAQUETTE/VUE INTÉRIEURE	DÉTAIL	CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES / NOTE
STADE DU FOOTBALL (1988) SYDNEY AUSTRALIE ~41 000 PLACES ARCHITECTE : COX RICHARDSON TAYLOR AND PARTNERS				
				<ul style="list-style-type: none"> - La toiture ne couvre que la partie haute des gradins entiers; - Les tribunes latérales sont plus hautes que celles situées aux extrémités; - Les gradins sont ventilés grâce aux brèches entre la toiture et les gradins.
STADE DE FRANCE (1998) SAINT-DENIS FRANCE ~80 000 PLACES ARCHITECTES : MACARY-ZUBLENA-REGEMBAL-CONSTANTINI				
				<ul style="list-style-type: none"> - Les tribunes et la toiture sont continues. - La partie intérieure de toiture est une verrière qui atténue le contraste entre les zones ensoleillées et celles à l'ombre.
STADE GOTTLIEB-DAIMLER (1993) STUTTGART ALLEMAGNE ~53 000 PLACES ARCHITECTES : SIEGEL UND PARTNER				
				<ul style="list-style-type: none"> - Une membrane couvre l'intégralité des gradins et protège les spectateurs des intempéries; - La toiture et les gradins sont séparés par une brèche horizontale sur tout le pourtour du stade.

VUE GLOBALE	PLAN/ VUE AÉRIENNE	COUPE/ MAQUETTE/VUE INTÉRIEURE	DÉTAIL	CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES / NOTE
STADE CHEJU (2001) CORÉE DU SUD ~42 000 PLACES ARCHITECTE : IKUM ARCHITECTS				
				<ul style="list-style-type: none"> - Une toiture membrane couvre environ la moitié des gradins; - Les gradins sont divisés en deux niveaux; - Une grande brèche sépare les gradins et la toiture.
STADE TELSTRA (2000) SYDNEY AUSTRALIE ~110 000 (~83 000) PLACES ARCHITECTE : HOK&LOBB				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de toiture discontinue pour les JO, devenue continue après (avec une capacité réduite); - La brèche entre les gradins et la toiture est remplie par des jalousies (ventilation réglable).
STADE MANCHESTER (2002) MANCHESTER ROYAUME-UNI ~38 000 (~48 000) PLACES ARCHITECTE : ARUP ASSOCIATES				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade "modifiable": stade de foot avec une piste d'athlétisme transformé en stade de football; - La toiture de forme "U" est transformée en une toiture continue qui couvre les gradins entiers; - La brèche entre les gradins et la toiture est remplie par des jalousies (ventilation réglable).

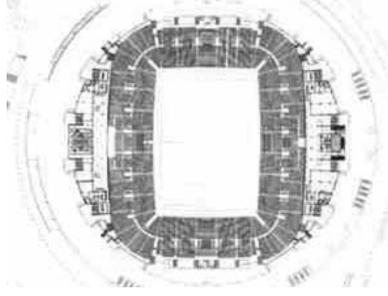
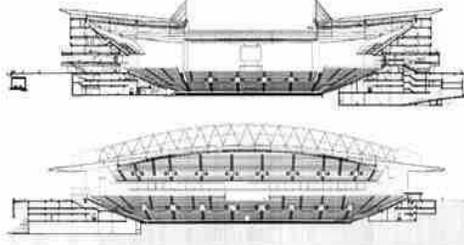
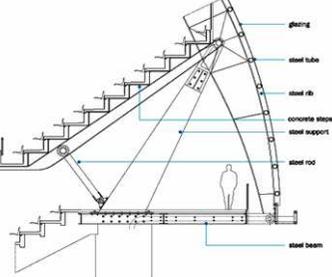
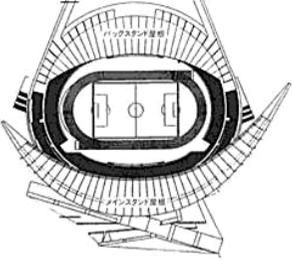
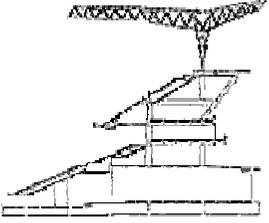
VUE GLOBALE	PLAN/ VUE AÉRIENNE	COUPE/ MAQUETTE/VUE INTÉRIEURE	DÉTAIL	CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES / NOTE
STADE DRAGAO (2003) PORTUGAL ~50 000 PLACES ARCHITECTE : M. SALGADO				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de la famille de Stade de France : les tribunes et la toiture sont continues; - Les gradins sont disposés sur deux niveaux; - Le stade est uniformément éclairé grâce à la toiture translucide.
STADE LICORNE (1995) AMIENS FRANCE ~12 000 (~20 000) PLACES ARCHITECTES : CHAIX & MOREL ASSOCIES				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de football, type "anglais" avec une toiture en verrière qui couvre l'intégralité des gradins → le stade a un bon niveau d'éclairément; - Les angles sont ouverts; - Le stade est extensible par des tribunes superposées sur les gradins existants.
STADE MIYAGI (2000) SENDAI JAPON ~49 000 PLACES ARCHITECTE : A. HITOSHI				
				<ul style="list-style-type: none"> - Stade de football et d'athlétisme encaissé dans le sol; - La toiture se compose de deux parties qui couvrent les tribunes principales; - Cette configuration est "sensible" aux vents parallèles à l'axe longitudinal du stade.

Tableau 9 : Exemples des stades modernes

Les stades modernes montrent une grande diversité morphologique. Leur majorité comporte des toitures qui ont une tendance à couvrir une surface de tribunes de plus en plus grande. **La majorité des exemples étudiés possèdent les toitures continues qui couvrent quasiment la surface totale des tribunes.** On trouve des exemples où pour un événement spécifique les extrémités ou une des extrémités des tribunes sont élargies afin d'accueillir plus des spectateurs. La toiture du Stade de Manchester [Arup, 2002] a été complétée de sorte à couvrir intégralement les gradins. La même opération a été réalisée au Stade Telstra de Sydney lorsque les extrémités supplémentaires ont été démolies ou partiellement démolies.

Une minorité de stades étudiés a une toiture discontinue.

Il est évident que les toitures qui couvrent intégralement les gradins fournissent une protection plus efficace contre les facteurs climatiques que celles qui ne les couvrent que partiellement. Une toiture discontinue non seulement ne protège pas du vent, du rayonnement solaire et de la pluie les spectateurs placés dans la partie ouverte des gradins mais offre également moins de protection contre certains phénomènes climatiques (par exemple: la pluie battante, rayonnement solaire direct) aux spectateurs qui se trouvent sous la toiture.

Les sujets de la présente recherche sont les grands stades modernes. D'une part ces investissements de grande ampleur (stades de capacité de 50 000 à 80 000 places) permettent la construction de toitures grandioses et d'autre part, en raison même de ces grandes dimensions leur effet modificatif sur l'écoulement d'air est plus important. En conséquence, l'effet de toiture nécessite une étude approfondie. Un autre facteur aussi important est **la proportion des ouvertures sur la façade.** Ainsi, dans un premier temps les paramètres morphologiques à étudier qui ont été choisis sont les suivants :

- **Le sens et l'amplitude de l'inclinaison de toiture**, décrit par l'angle d'inclinaison (Stadium Australia - toiture inclinée vers le terrain à $\sim 15^\circ$, Stade de France – toiture horizontale, Stade Licorne Amiens, toiture montante vers le terrain à $\sim 40^\circ$).
- **La congruence ou différence du plan des gradins et du plan de toiture**, en d'autres termes l'existence de **débord de toiture vers l'extérieur** (Stade de France) **ou vers l'intérieur du stade.** Ce dernier cas induit une ouverture centrale (oculus) réduite (Stade de France, configuration athlétisme).
- **L'existence de brèches horizontales.** Elles séparent soit les différents niveaux des gradins, soit les gradins de la toiture, ou éventuellement les gradins de l'aire de jeu, ce qui peut servir à intensifier la ventilation de la pelouse. L'emploi des brèches horizontales permet aux spectateurs, qui se trouvent dans la partie haute des gradins, d'être moins éloignés de l'aire de

jeu. Les brèches horizontales ont également des rôles fonctionnels et sécuritaires, notamment ils séparent les spectateurs, facilitent la circulation dans le bâtiment et l'évacuation. Ce paramètre architectural peut être décrit par la localisation des brèches et par le quotient de l'aire des brèches projetées sur un plan vertical et l'aire totale de façade projetée également sur un plan vertical. Ce quotient représente le rapport de vide (brèches) à la surface totale, en conséquence il caractérise la porosité de façade. [Gandemer et Guyot, 1981]

Les brèches horizontales permettent une certaine flexibilité : au Stade de France la tribune basse est mobile, elle recouvre la piste d'athlétisme en configuration football, tandis qu'en configuration athlétisme elle recule de 15 mètres [Gravelaine, 1997].

Afin d'atténuer l'intensité de ventilation à travers les brèches horizontales des brise vents peuvent être placés dans les brèches réduisant ainsi la section libre [Dufresne de Virel, 1995(2)]. Ces derniers modifient la porosité de la façade. Ils peuvent être employés de manière généralisée sur le périmètre du stade, mais aussi uniquement aux endroits où les anomalies aérodynamiques apparaissent.

- **L'existence de brèches verticales.** Elles servent principalement à séparer les spectateurs (aspect de sécurité) et aussi à intensifier la ventilation [T et A, 1990-1991]. Elles sont également caractérisées par la porosité. Il existe deux sortes de brèches :

- **uniformément réparties;**

- **non- uniformément réparties (concentrées).**

Le dernier cas apparaît par exemple sous la forme d'ouvertures localisées dans les angles du stade (Stade de Reims) [Moreau, 2002 (2)]. Cette solution est particulière aux stades de football, classés dans les stades de type "anglais" [Vigneau, 1998] dans lesquels les angles ne possèdent pas de gradins car ce sont les endroits les moins appréciés par les supporters [John *et al.*, 2000].

Le Stade San Nicola à Bari [RPBW, 2002] possède des gradins séparés par des brèches verticales uniformément réparties.

Une configuration où la porosité de façade est représentée par des écrans poreux et non par des brèches, représente un intérêt théorique.

Afin qu'on puisse étudier l'effet de toiture, il est nécessaire de tester une configuration sans toiture.

Le grand nombre des paramètres à faire varier a nécessité la réalisation d'une **maquette de stade à géométrie variable**. Cette maquette permet une modification morphologique relativement rapide et facile.

Afin de pouvoir distinguer l'effet des différents paramètres morphologiques, un seul paramètre est changé à la fois sur la maquette.

2.2 CONCEPTION DE LA MAQUETTE A GEOMETRIE VARIABLE

Dans un premier temps la démarche consiste à **étudier la relation entre la configuration architecturale et les caractéristiques de l'écoulement d'air au sein du stade, en particulier au niveau des tribunes**. Pour cela une série d'**essais paramétriques** est effectuée en soufflerie à couche limite sur une maquette à géométrie variable. Des champs de rapport de vitesses moyennes et d'écart types relatifs entre un point de référence et les points de mesures dans le stade sont déterminés dans plusieurs configurations. Ces vitesses et les écart-types associés sont mesurés par anémométrie à fil chaud à différents endroits, en particulier au niveau des tribunes et de l'aire de jeu.

La maquette à géométrie variable représente un stade compact, dit "traditionnel" tel ceux de la famille "Stade de France" (Tableau 8). La morphologie de la maquette, notamment ses dimensions et proportions ont été déterminées à partir des caractéristiques des stades modernes de grande capacité (Figures 62 et 63). L'idée d'utilisation d'une maquette à géométrie variable [Szucs *et al.*, 2005(4)] est liée à la nature des expériences à réaliser en soufflerie : essais paramétriques où la modification relativement rapide et libre de la maquette est indispensable. Les paramètres suivants ont été modifiés :

- le plan du stade (configuration football et athlétisme, configuration uniquement football);
- la porosité de la façade (brèches verticales, horizontales, régulièrement réparties ou concentrées);
- l'inclinaison de toiture (toiture horizontale, montante ou descendante vers l'aire de jeu);
- le débord de toiture (débord vers l'extérieur du stade, ou vers l'intérieur en réduisant la dimension de l'ouverture centrale (l'oculus) de toiture).

La maquette comporte une toiture de plexiglas. L'échelle de la maquette est de 1:300, qui convient bien à l'échelle du vent reproduit dans la soufflerie et les dimensions de cette dernière. Le maître couple de la maquette ne dépasse pas la limite de 5 % de la section de la veine [Gandemer et Guyot, 1980].

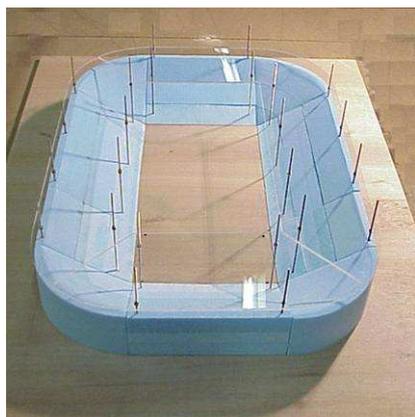


Figure 62 et Figure 63 : Vues de la maquette à géométrie variable

Le Tableau 10 résume les données principales de la maquette de configuration football et athlétisme et ceux de configuration uniquement football.

P	L	A	N		
				<i>FOOTBALL + ATHLETISME</i>	FOOTBALL
Surface de l'aire de jeu				100 mètres x 200 mètres	100 mètres x 140 mètres
Surface totale projetée sur un plan horizontal				226 mètres x 326 mètres	226 mètres x 270 mètres
Intervalle de l'hauteur totale*				~42 mètres – ~78mètres	
Hauteur de tribunes				~31 mètres – ~36 mètres	
Hauteur de brèches horizontales				~ 4.5 mètres	
Pente moyenne des tribunes				32°	
Dimensions d'ouverture centrale				100 mètres x 200 mètres	100 mètres x 140 mètres

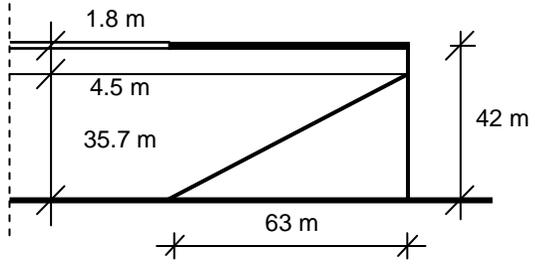
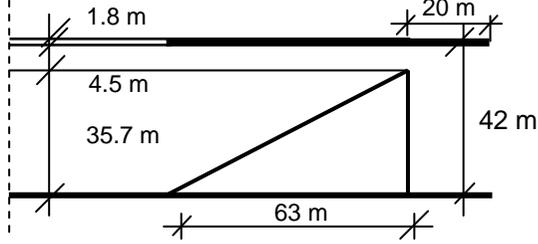
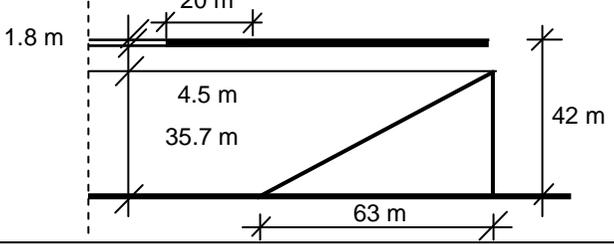
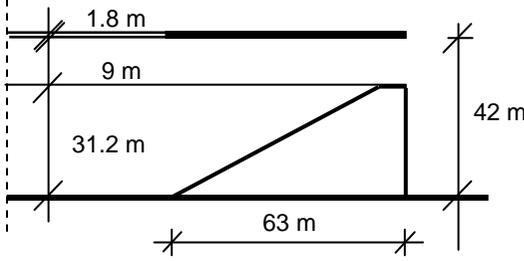
*La hauteur totale est mesurée entre le niveau d'aire de jeu et le point le plus haut de la toiture.

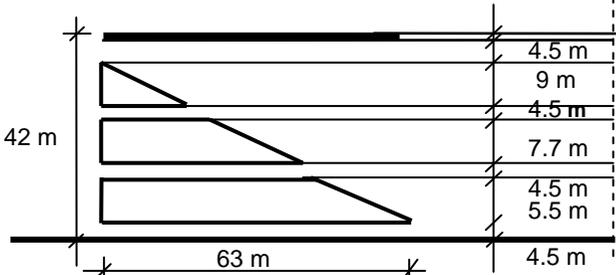
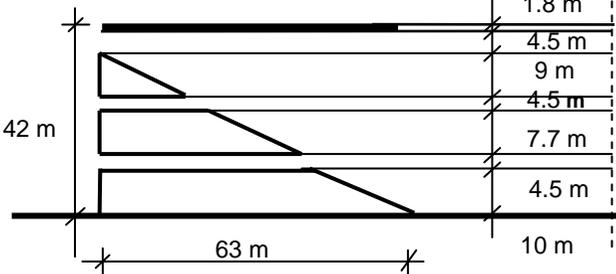
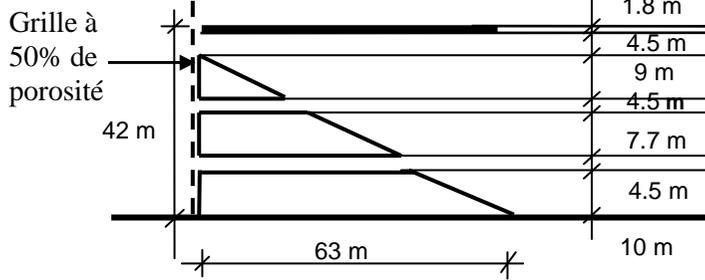
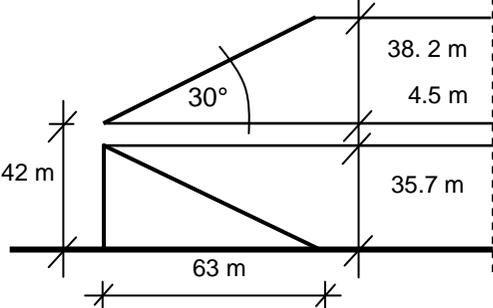
Tableau 10 : Données principales de la maquette à géométrie variable

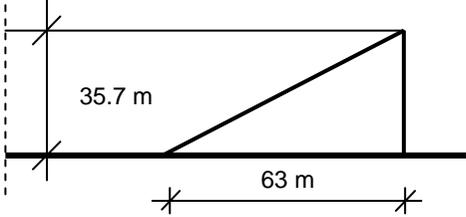
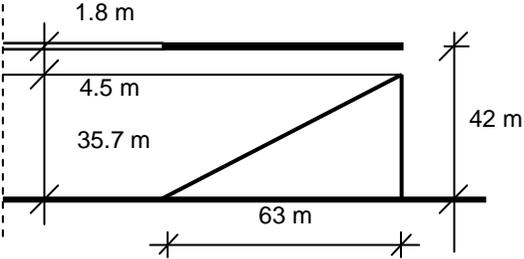
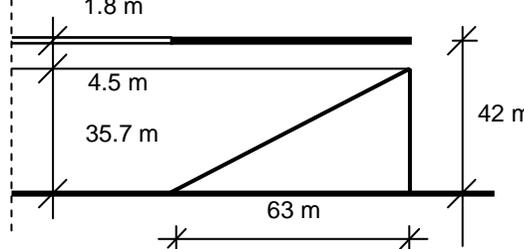
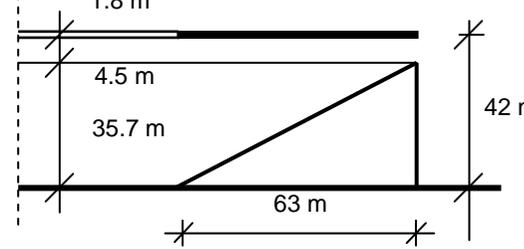
2.3 TABLEAU DES CONFIGURATIONS A ETUDIER

Le Tableau 11 illustre les 20 configurations du stade étudiées en soufflerie.

N° de configuration	Description	Coupe / détail
C 1	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	
C 2	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est inclinée à 15° vers l'aire de jeu. ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres. ◦ La hauteur du bord extérieur de toiture est de 42 mètres. ◦ La hauteur du bord intérieur de toiture est de 25.1 mètres. 	
C 3	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture monte à 15° vers l'aire de jeu. ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres. ◦ La hauteur du bord extérieur de toiture est de 42 mètres. ◦ La hauteur du bord intérieur de toiture est de 58.9 mètres. 	
C 4	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est fermé. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	

N° de configuration	Description	Coupe / détail
C 4 Bis	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est fermée uniquement dans les virages du stade. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	
C 5	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale et elle a un débord de 20 mètres vers l'extérieur tout au long du périmètre du stade. ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	
C 6	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale et elle a un débord de 20 mètres vers l'intérieur du stade (l'ouverture centrale de toiture – l'oculus – est réduite). ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	
C 7	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 9 mètres. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. ◦ 	

N° de configuration	Description	Coupe / détail
C 8	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ Les espaces (brèches horizontales) entre la toiture et la tribune, entre les niveaux des tribunes et entre l'aire de jeux et la tribune sont de 4.5 mètres. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	
C 9	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ Les espaces (brèches horizontales) entre la toiture et la tribune et entre les niveaux des tribunes sont de 4.5 mètres. ◦ La hauteur totale est de 42 mètres. 	
C 10	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ Les espaces (brèches horizontales) entre la toiture et la tribune et entre les niveaux des tribunes sont de 4.5 mètres. ◦ La façade est couverte par une grille à 50% de porosité. ◦ La hauteur totale est de 42 mètres. 	
C 11	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture monte à 30° vers l'aire de jeu. ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres. ◦ La hauteur du bord extérieur de toiture est de 42 mètres. ◦ La hauteur du bord intérieur de toiture est de 78.4 mètres. 	

N° de configuration	Description	Coupe / détail
C 12	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Le stade ne comporte pas de toiture. ◦ La hauteur totale du stade est de 35.7 mètres. 	
C 13	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Le stade ne comporte pas de piste d'athlétisme → la longueur du stade est réduite (266 mètres). ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres. ◦ La hauteur totale est de 42 mètres. 	
C 14	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres. ◦ Le stade ne comporte pas de tribune dans les virages – type stade "anglais" (virages ouverts). ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	
C 15	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres. ◦ Le stade comporte des ouvertures de largeur de 7.5 mètres dans les virages. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	

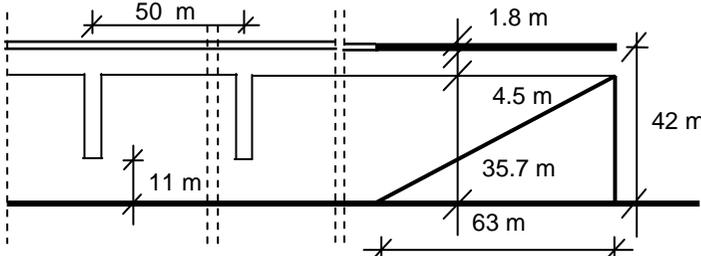
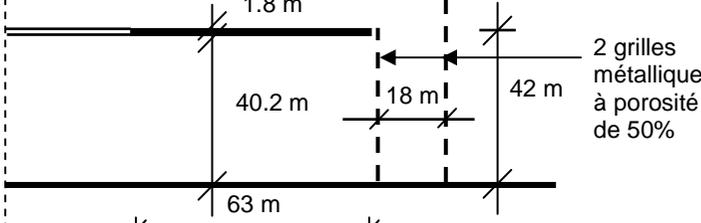
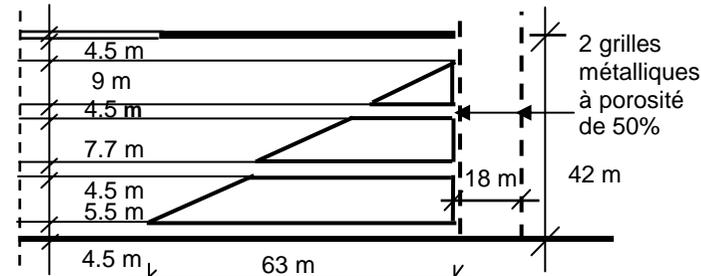
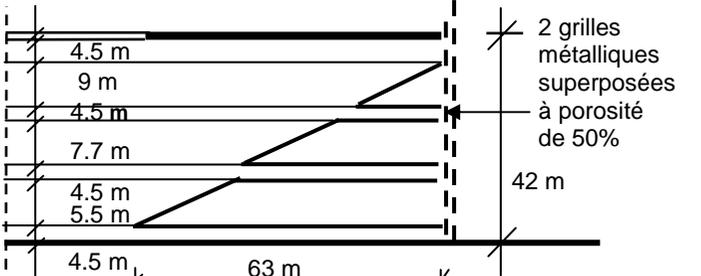
N° de configuration	Description	Coupe / détail
C 16	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ L'espace entre la toiture et la tribune est de 4.5 mètres. ◦ Les gradins sont interrompus par des brèches verticales à 7.5 mètres de largeur, régulièrement réparties. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	
C 17	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ "Cas théorique" : le stade ne comporte pas des gradins. ◦ La façade du stade se constitue de deux grilles métalliques, à porosité de 50%, placées de 18 mètres l'une de l'autre. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	
C 18	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ Les espaces (brèches horizontales) entre la toiture et la tribune et entre les niveaux des tribunes sont de 4.5 mètres. ◦ La façade du stade est couverte de deux grilles métalliques, à porosité de 50%, placées de 18 mètres l'une de l'autre. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	
C 19	<ul style="list-style-type: none"> ◦ La toiture est horizontale. ◦ Les espaces (brèches horizontales) entre la toiture et la tribune et entre les niveaux des tribunes sont de 4.5 mètres. ◦ La façade du stade est couverte de deux grilles métalliques superposées, à porosité de 50%. ◦ La hauteur totale du stade est de 42 mètres. 	

Tableau 11 : Configurations architecturales du stade testées en soufflerie

3. CARACTÉRISATION STATISTIQUE DE L'ÉCOULEMENT

3.1 PARAMÈTRE DESCRIPTIF DE LA GÊNE DUE AU VENT

L'écoulement au sein du stade, en particulier au niveau des tribunes est caractérisé par le groupement Ψ introduit par Gandemer [Gandemer et Guyot, 1976], qui est un indice adimensionnel et exprime la vitesse moyenne et son écart type en un point particulier (i) par rapport à un point de référence. Le point particulier se trouve – dans le cas de cette étude – au niveau des tribunes ou de l'aire de jeu, tandis que le point de référence est placé en amont du stade dans une zone dégagée, non perturbée par les obstacles (bâtiments, topographie etc.) environnants.

$$\Psi = \frac{\overline{U}_i + \sigma_i}{\overline{U}_{ref} + \sigma_{ref}} \quad \text{[Équation 21]}$$

où

\overline{U}_i est la vitesse moyenne en un point i ;

σ_i est l'écart type de la vitesse moyenne en un point i ;

\overline{U}_{ref} est la vitesse moyenne en un point de référence;

σ_{ref} est l'écart type de la vitesse moyenne en un point de référence.

Les valeurs de Ψ sont mesurées en plusieurs points au niveau des tribunes et de l'aire de jeu. L'ensemble des points de mesure, au total 52, se situe dans un maillage relativement régulièrement repartit au niveau des tribunes. La vitesse au niveau et au-dessus de l'aire de jeu a été également mesurée en trois points - afin de compléter les résultats. La Figure 64 illustre la distribution des points de mesure. Dans le cas où éventuellement le plan du stade est modifié, le maillage original est respecté.

Les résultats mesurés en ces points sont représentés sous la forme des cartes d'isovaleurs de Ψ à l'aide du logiciel de cartographie Surfer. La Figure 65 illustre un exemple de ce mode de représentation. La méthode d'interpolation est le *kriging*. Il a été choisi pour les caractères favorables suivants :

- il ne change pas les données et donne des contours réalistes dans la plupart des cas;
- les contours sont lisses;
- il ne donne pas trop d'importance aux valeurs extrêmes, ce qui supprime l'effet "bull-eye".

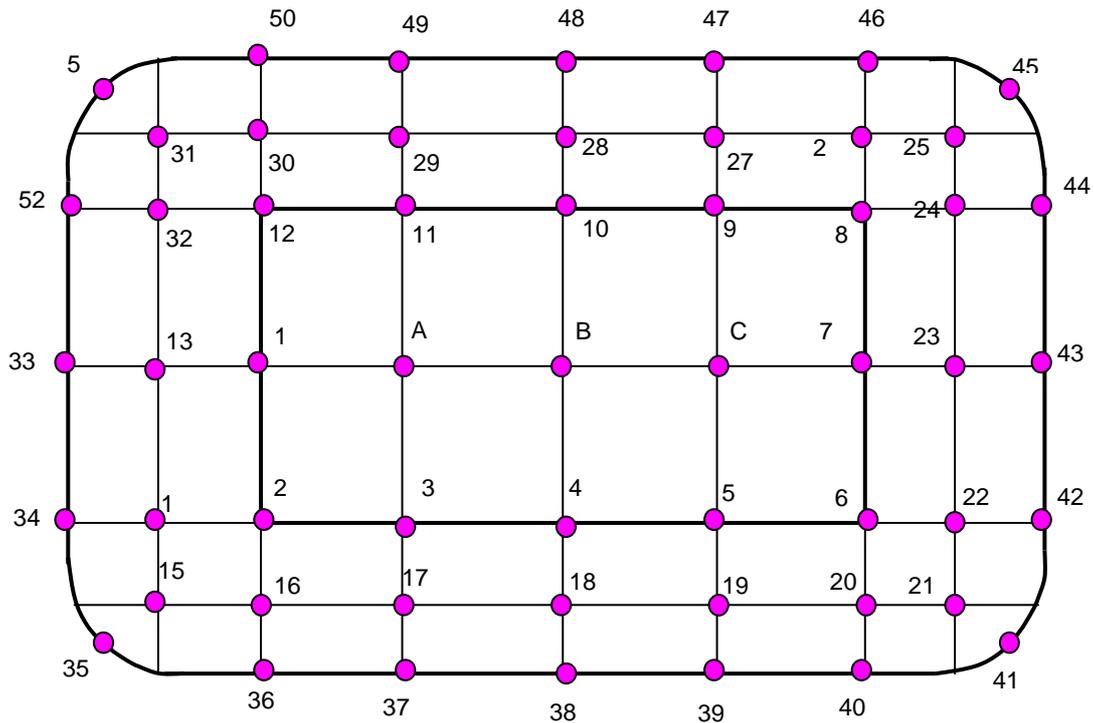


Figure 64 : Plan du stade avec des points de mesure au niveau des tribunes et de l'aire de jeux.

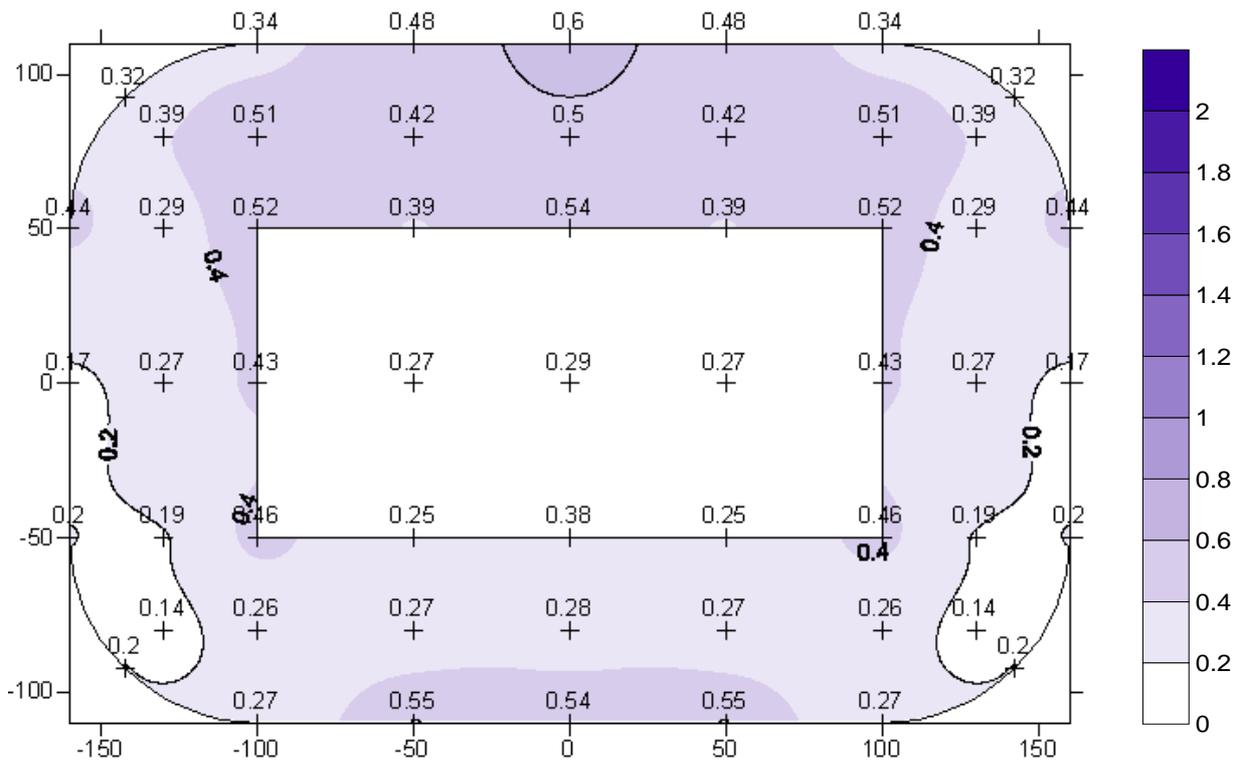


Figure 65 : Exemple de la méthode de présentation des données par une carte d'isovaleurs de Ψ

3.2 MÉTHODE D'ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

Théoriquement, il serait possible de sélectionner un nombre infini de points de mesure au niveau des tribunes et théoriquement à chaque point correspondrait une valeur de Ψ . Evidemment, il n'est pas possible de déterminer par mesure des valeurs de Ψ qui correspondraient au nombre infini de points de mesure. L'ensemble de ces valeurs appartenant au nombre infini de points de mesure constitue la population statistique intégrale. Pour les essais paramétriques du présent travail un maillage relativement uniforme constitué de 52 points localisés au niveau des tribunes a été choisi. 12 points supplémentaires ont été également sélectionnés au niveau et au-dessus de l'aire de jeu.

Chaque configuration du stade a été testée pour trois incidences de vent :

- Incidence longitudinale (L) – parallèle à l'axe longitudinal du stade;
- Incidence transversale (T) – perpendiculaire à l'axe longitudinal du stade;
- Incidence diagonale (D) – forme un angle de 30° avec l'axe longitudinal du stade.

Les configurations du stade étudiées sont symétriques, en conséquence l'ensemble des incidences étudiées signifie au total huit directions comme cela est illustré par la Figure 66.

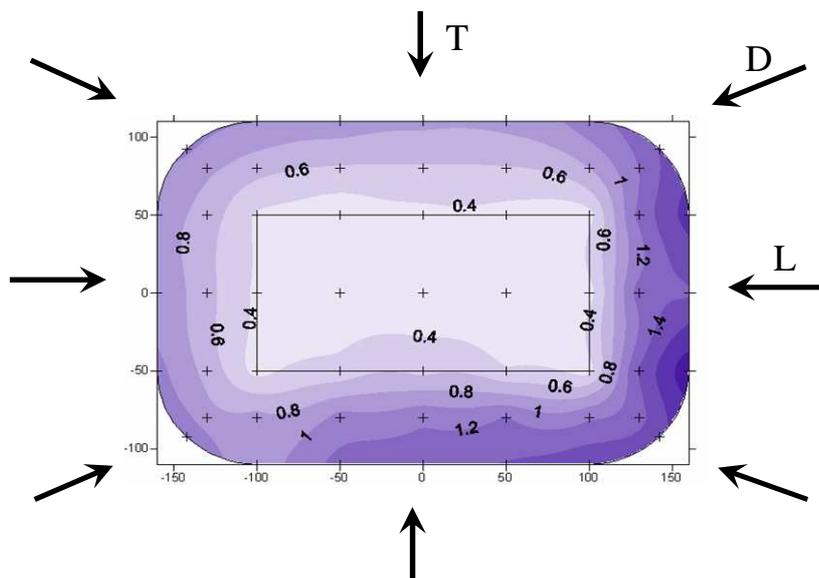


Figure 66 : Incidences du vent pour lesquelles la maquette symétrique est étudiée

Les points de mesure correspondent à un maillage quasi régulier, donc la population des valeurs de Ψ constitue un échantillonnage systématique [Norme statistique, 1983]. Le nombre de points de mesure sélectionné est satisfaisant, puisque la probabilité qu'il existe des différences entre les caractéristiques statistiques de l'échantillon et celles de la population intégrale est négligeable. Ceci permet de caractériser la population statistique intégrale par les paramètres statistiques de l'échantillon de nombre réduit.

Pour chaque incidence de chaque configuration la densité de probabilité des données et la fréquence cumulée de Ψ sont déterminées. La Figure 67 illustre le caractère de ces fonctions. Les fonctions de densité de probabilité expérimentale, en d'autres termes les histogrammes appartenant à chaque configuration montrent en général un caractère unimodal et asymétrique. Le caractère asymétrique découle du fait que les valeurs de Ψ ont une limite minimale, notamment le zéro, cependant théoriquement elles n'ont pas de limite supérieure.

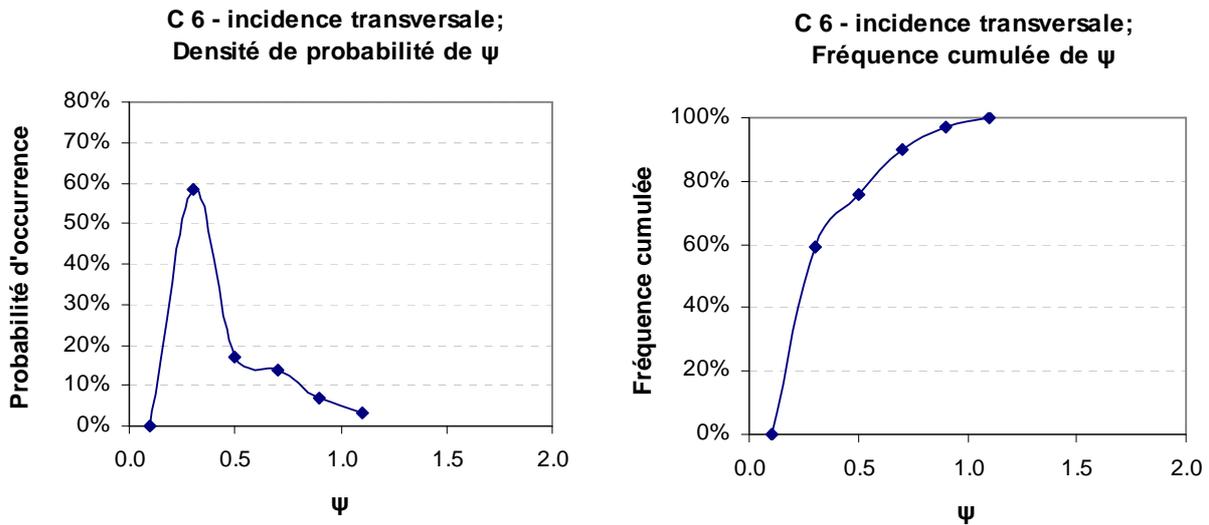


Figure 67 : Caractère des fonctions décrivant la densité de probabilité et la fréquence cumulée de Ψ une incidence d'une configuration

Le fil conducteur de ce travail étant le confort aérothermique des spectateurs, on s'intéresse à des indices statistiques qui décrivent les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes.

- A partir de la fonction de densité de probabilité expérimentale il est possible de calculer **la moyenne arithmétique** de la population des valeurs de Ψ appartenant à chaque incidence de chaque configuration. La moyenne arithmétique est le quotient de la somme des observations par leur nombre. Elle caractérise les conditions aérauliques moyennes au niveau de l'intégralité des tribunes. Outre la moyenne arithmétique le médian est la valeur telle que 50% de la population statistique lui sont supérieurs et 50% de la population lui sont inférieurs. Le médian est très sensible aux valeurs extrêmes, c'est pourquoi pour décrire les conditions aérauliques globales la moyenne arithmétique a été retenue. Une autre sorte de moyenne, le mode indique la valeur qui apparaît le plus fréquemment dans la population [Norme statistique, 1983].
- À partir des valeurs de la moyenne arithmétique, **la moyenne arithmétique pondérée** des valeurs de Ψ par l'occurrence des différentes incidences du vent, le $\bar{\Psi}^*$, est également calculée :

$$\bar{\Psi}^* = \frac{2 \cdot \bar{\Psi}_D + \bar{\Psi}_L + \bar{\Psi}_T}{4} \quad [\text{Équation 22}]$$

où

$\bar{\Psi}^*$ est la moyenne arithmétique pondérée des valeurs de Ψ pour l'incidence diagonale, longitudinale et transversale d'une configuration du stade;

$\bar{\Psi}_D$ est la moyenne arithmétique des valeurs d'une population de Ψ pour l'incidence diagonale d'une configuration du stade;

$\bar{\Psi}_L$ est la moyenne arithmétique des valeurs d'une population de Ψ pour l'incidence longitudinale d'une configuration du stade;

$\bar{\Psi}_T$ est la moyenne arithmétique des valeurs d'une population de Ψ pour l'incidence transversale d'une configuration du stade;

- **L'écart type**, σ_ψ , en d'autres termes la dispersion des valeurs de Ψ autour de la valeur moyenne est également déterminée pour chaque configuration étudiée.

Les fonctions de distribution expérimentale (ou fréquence cumulée des données) permettent de déterminer la probabilité d'occurrence des valeurs inférieures et supérieures à une valeur particulière de Ψ . Tandis que les fonctions de densité de probabilité permettent de définir l'occurrence d'une valeur de Ψ bien précise. La Figure 68 éclaire la différence entre ces fonctions au travers deux exemples :

- L'exemple de la fonction de densité de probabilité illustre que la probabilité d'occurrence de valeur de $\Psi \approx 0.7$ correspond à environ 40%.
- L'exemple de la fonction de fréquence cumulée indique qu'environ 90% de la population des données sont inférieurs à $\Psi = 1$, et 10% et lui sont supérieurs.

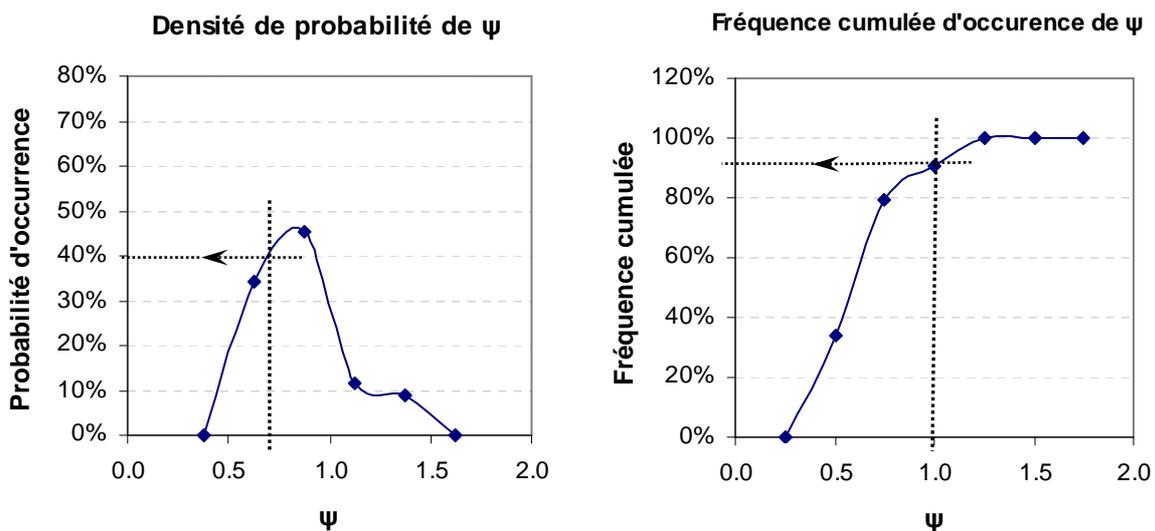


Figure 68 : Signification des fonctions décrivant la densité de probabilité et la fréquence cumulée de Ψ pour une incidence d'une configuration

- L'étendue d'une population peut être caractérisée par les valeurs extrêmes d'une population : compte tenu du nombre des données et du caractère des fonctions de distribution il est

raisonnable de décrire les configurations étudiées par les valeurs du premier et du neuvième décile de chaque configuration. **Le première décile**, le $\Psi_{10\%}$ est la valeur telle que 90% de la population lui sont supérieurs et 10% de la population lui sont inférieurs. **Le neuvième décile**, le $\Psi_{90\%}$ est la valeur telle que 10% de la population lui sont supérieurs et 90% de la population lui sont inférieurs [Norme statistique, 1983].

La Figure 69 illustre une courbe de fréquence cumulée de valeurs de Ψ . Sur cette courbe les déciles choisis sont marqués: $\Psi_{10\%}$ et $\Psi_{90\%}$. Ces déciles sont les valeurs d'abscisse correspondant aux points d'ordonnée p (probabilité) de la courbe représentative de la fonction de répartition. Le p est exprimé en pourcentage.

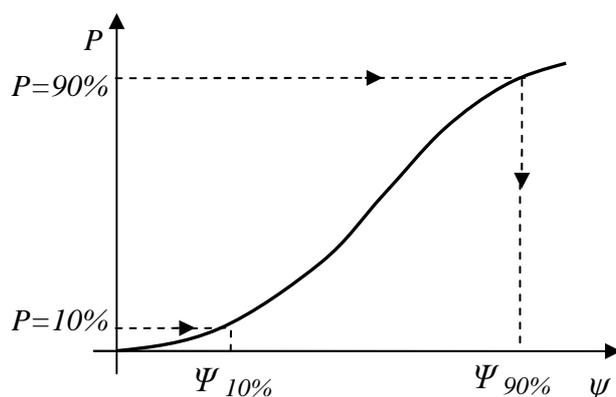


Figure 69 : Premier et neuvième décile de ψ marqués sur une courbe de fréquence cumulée

L'analyse de données pourrait également être exécutée à partir des valeurs de quartiles qui représentent la population par tranches de 25%. Pour les fonctions de distributions "régulières" (Gauss, Weibull etc.) et/ou pour les données de nombres élevées on peut choisir des limites plus strictes, par exemple de 2% ou de 5%. Ces valeurs sont également nommées les limites d'intervalle de confiance [Kindler 1969].

Le premier et le dernier décile de la population des données permettent de caractériser les zones de calme et les zones fortement ventilées des tribunes. Ces valeurs caractérisent donc des conditions aérodynamiques "extrêmes" au niveau des tribunes. Ceci signifie qu'un spectateur qui se trouve au sein de ces zones serait exposé à ces conditions aérodynamiques "extrêmes". Le premier et le dernier décile caractérisent également la capacité protectrice du stade.

Cependant, ces valeurs seules ne sont pas suffisantes pour décrire la qualité aéraulique du stade – elles doivent être traitées avec les valeurs de moyenne arithmétique correspondante. La Figure 70 montre qu'une valeur identique de $\Psi_{90\%}$ peut être le résultat :

- d'une distribution avec une valeur moyenne moins importante ($\bar{\Psi}_1$) et un écart-type ($\sigma_{\psi 1}$) plus important - marqué par une courbe continue

- ou une valeur moyenne plus importante ($\bar{\Psi}_2$) et un écart-type (σ_{Ψ_2}) moins important - marqué par une courbe discontinue.

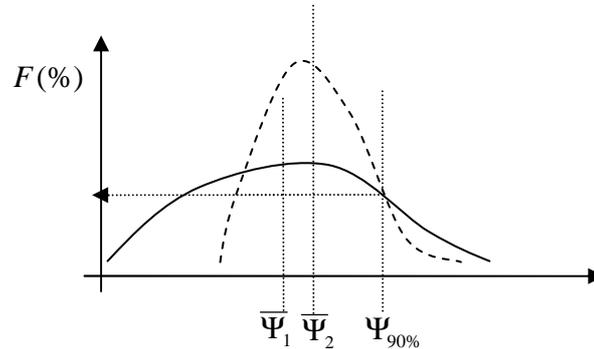


Figure 70 : Valeurs identiques de $\Psi_{90\%}$ originaires de distributions différentes

- o La qualité aérodynamique du stade est indiquée en outre de sa capacité protectrice par l'homogénéité de l'écoulement au niveau des tribunes. Le quotient de la moyenne arithmétique de la population des valeurs de Ψ sur le premier décile, indique l'homogénéité de l'écoulement par rapport aux zones les plus calmes. Tandis que le quotient de la moyenne arithmétique de la population des valeurs de Ψ sur le dernier décile, indique l'homogénéité de l'écoulement par rapport aux zones les plus fortement ventilées. Ces indices, le *IH 10%* et le *IH 90%*, caractérisent donc l'homogénéité de l'écoulement par rapport aux zones "extrêmes" au niveau des tribunes :

$$IH10\% = \frac{\Psi_{10\%}}{\bar{\Psi}} \quad \text{[Équation 23]}$$

$$IH90\% = \frac{\Psi_{90\%}}{\bar{\Psi}} \quad \text{[Équation 24]}$$

L'écoulement est d'autant plus homogène que les valeurs de ces quotients sont plus proches de 1.

- o Ainsi, sur la Figure 70 dans le premier cas ($\bar{\Psi}_1$ et $\Psi_{90\%}$) l'écoulement est hétérogène, comme cela est illustré par la large étendue de population des données de Ψ , contrairement au deuxième cas ($\bar{\Psi}_2$ et $\Psi_{90\%}$) où l'étendue est moins importante, en conséquence l'écoulement est globalement plus homogène.
- o Outre l'étendue des zones concernées par les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ **la localisation** de ces zones est également à étudier afin de pouvoir déterminer les modifications morphologiques nécessaires du stade pour atteindre des caractéristiques plus favorables à l'écoulement. Ces modifications morphologiques peuvent signifier des changements globaux (exemple : choix d'une configuration de stade différente) ou locaux (exemple : traitements locaux comme des

écrans brise-vent). La Figure 71 montre le déplacement de ces zones "extrêmes" en fonction de l'incidence du vent.

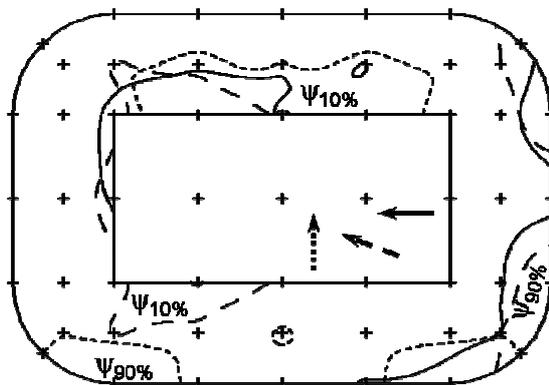


Figure 71 : Déplacement des zones concernées par les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ en fonction de l'incidence du vent. Les flèches indiquant l'incidence du vent sont marquées par des types de ligne identiques aux limites des zones concernées par les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$.

La localisation de zones caractérisées par les Ψ valeurs de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ comme leur étendue sont fonction de l'incidence du vent. Le produit de l'étendue de ces zones par les valeurs correspondantes de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ indique l'ampleur de ces conditions sur l'aire des tribunes concernées.

Les caractéristiques statistiques, notamment la valeur moyenne de Ψ et les valeurs de déciles, varient en fonction de la morphologie du stade et de l'incidence du vent. Cette variation peut être décrite par des courbes de tendance qui lie les caractéristiques statistiques aux différents paramètres morphologiques. Ces courbes des tendances peuvent être décrites dans notre analyse par des fonctions de régression. **Même si le nombre des points correspondant à certains graphiques est réduit, les courbes de régression indiquent le caractère de la relation** (exemple : monotone, non monotone, croissante, décroissante, existence d'une valeur minimale ou maximale locale etc.) entre les paramètres morphologiques et les caractéristiques statistiques. Bien évidemment, les courbes de tendances sont des illustrations approximatives de ces relations et sont valables uniquement dans l'intervalle marqué par les valeurs des points de mesure. Il est possible d'interpoler des valeurs dans cet intervalle à l'aide des courbes de régression, et éventuellement il serait possible d'extrapoler des valeurs dans une mesure très réduite. Ainsi, certaines caractéristiques statistiques peuvent être estimées même pour les paramètres morphologiques non étudiés.

D'une manière identique, les tendances de chaque caractéristique statistique en fonction de l'incidence du vent permettent d'estimer par interpolation même les valeurs qui correspondent aux incidences du vent non étudiées.

Les indices statistiques répertoriés ci-dessus sont caractéristiques du point de vue de l'effet mécanique et l'effet aérothermique du vent et s'appliquent à une fréquence d'occurrence identique pour toutes les

incidences de vent étudiées. Ils ont dans cette approche un sens abstrait et ils acquièrent un sens réel dès qu'ils sont adaptés à un site concret et sont associés aux données réelles du vent sur le site.

Ainsi, la méthode d'évaluation du confort aérothermique des spectateurs sera développée suivant deux axes conducteurs:

- D'une part le confort aérothermique dépend, outre le vent, principalement du paramètre température, en conséquence le confort sera évalué à partir d'une zone de confort composée des limites thermiques et mécaniques [Chapitre II.1.] qui tient compte de l'interaction de ces paramètres climatiques.
- D'autre part la fréquence d'occurrence du vent de différentes vitesses et de différents secteurs varie selon le site géographique, en conséquence les indices caractérisant l'écoulement seront pondérés par les valeurs de fréquence d'occurrence.

L'évaluation de confort aérothermique à partir d'une zone de confort intégrée composée des limites thermiques et mécaniques et en tenant compte de la fréquence d'occurrence des différents paramètres climatiques, en particulier celle du vent et de la température sera développée dans les chapitres suivants.

4. CARACTÉRISATION DE LA SOUFFLERIE À COUCHE LIMITE

4.1 SIMULATION DU VENT A ÉCHELLE REDUITE EN SOUFFLERIE

Le vent est un écoulement turbulent caractérisé par une vitesse moyenne (\bar{U}) et son écart type (σ). Localement la vitesse du vent varie en direction et en grandeur [Chapitre I.2.].

Les caractéristiques du vent dans les basses couches atmosphériques, de 0 à environ 500 mètres au-dessus du sol, sont directement liées à de nombreux paramètres, dont la rugosité du sol, la topographie du terrain etc.

La recherche d'une reproduction correcte de la couche limite atmosphérique a conduit à la création d'une nouvelle génération de souffleries : les souffleries à couche limite. Elles se différencient principalement des souffleries aérodynamiques classiques par les points suivants:

- Niveau des vitesses plus faible : maximum 20 – 30 m/s;
- Taux de turbulence pratiquement quelconque, alors que tout est conditionné dans les souffleries classiques pour régulariser, "laminariser" et uniformiser le flux (chambre de tranquillisation, grilles).
- Dimensions de la veine d'expérience très importante, notamment la longueur pour disposer de suffisamment d'espace pour intervenir et modeler les caractéristiques du flux [Gandemer et Guyot, 1980].

Suivant le type de vent qu'on veut reproduire différentes classes de rugosités, dont la densité et la hauteur varient sont placées sur le sol en amont de la maquette afin de développer une couche limite turbulente.

La soufflerie où les essais paramétriques ont été menés est une des souffleries à couche limite atmosphérique du CSTB Nantes. Elle est un circuit fermé, dit de type "à retour" qui se boucle dans un plan vertical. Elle possède une veine de longueur 13 mètres, de largeur 4 mètres et de hauteur variable comprise entre 2 et 2.5 mètres. La vitesse peut atteindre 12 m/s. La soufflerie est équipée d'un support de sonde télécommandé permettant un déplacement au mm dans les trois directions. Elle possède également un plateau tournant. La Figure 72 illustre la veine, les éléments de rugosité et la maquette du stade.

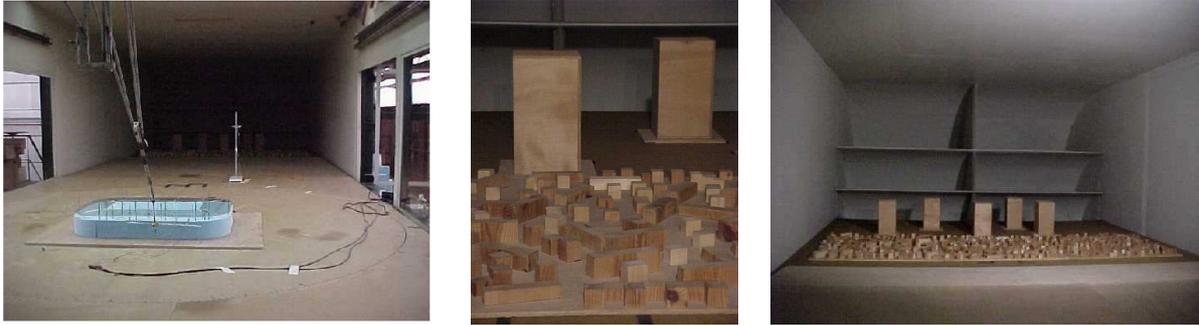


Figure 72 : Maquette dans la veine I — Détail de rugosité — Ensemble des éléments de rugosité

Selon la classification de l'EUROCODE [Eurocode Partie 2-4, 1995] un vent de catégorie II, vent de rase campagne a été reproduit pour les études paramétriques. Les Figures 73 et 74 représentent les caractéristiques de ce type du vent, en particulier le gradient vertical de la vitesse moyenne et l'intensité de la turbulence en fonction de la hauteur.

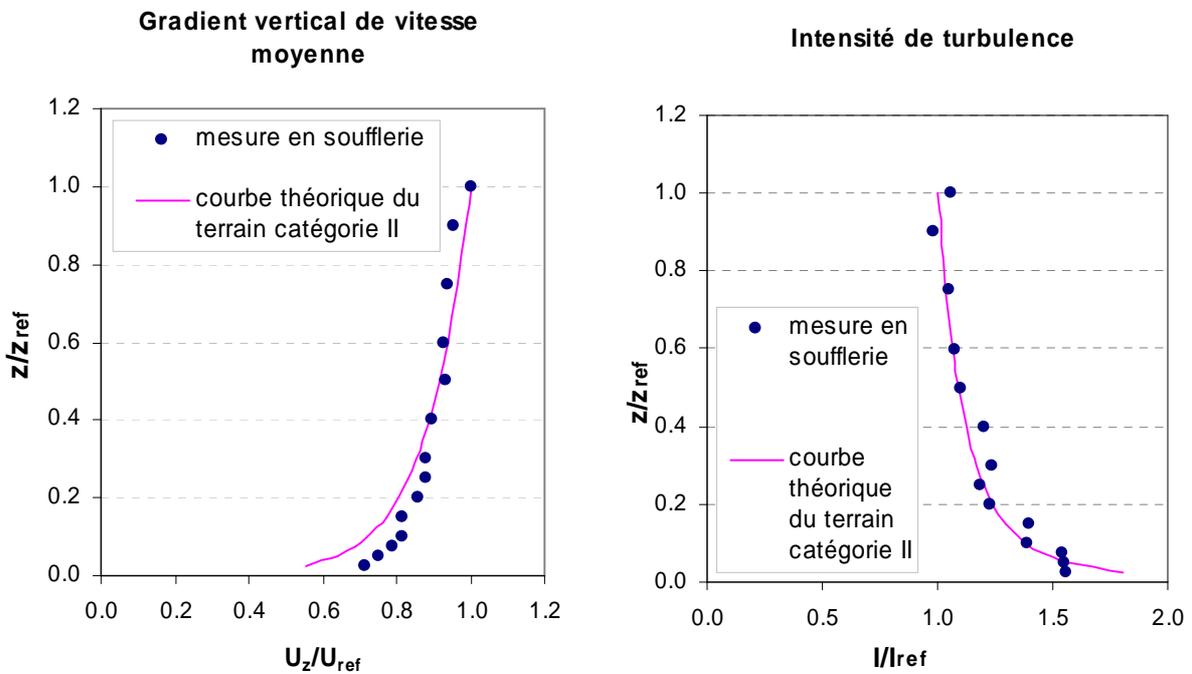


Figure 73 et Figure 74 : Gradient vertical de la vitesse moyenne et profil de turbulence

L'étude sur maquette exige une reproduction fidèle de la géométrie du modèle. Afin que les phénomènes d'écoulement autour de la maquette soient similaires à ceux qui se formeraient autour de l'objet réel, le maître couple de la maquette ne doit pas dépasser 5% de la section verticale de la veine de mesure [Gandemer et Guyot, 1976]. La maquette étudiée est à l'échelle 1:300, ce qui représente un maître couple d'environ 2% de la section de veine.

La similitude théorique demande l'égalité des nombres de Reynolds (\Re) entre le modèle et l'objet en vraie grandeur. Le nombre de Reynolds est fourni par le produit d'une vitesse caractéristique \bar{U} ; par une dimension caractéristique D , divisé par la viscosité cinématique ν du fluide :

$$\Re = \frac{\bar{U} \cdot D}{\nu} \quad \text{avec } \nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s} \text{ pour un air à } 20^\circ\text{C}$$

[Équation 25]

L'écoulement est turbulent lorsque les valeurs du nombre de Reynolds dépassent celles correspondant au régime critique soit $\Re \cong 10^5$.

A l'échelle vraie grandeur les structures bâties telles que les stades correspondent à des valeurs supercritiques voir hypercritiques du nombre de Reynolds ($>10^6$). Le respect rigoureux du Reynolds, à échelle réduite 1/300, supposerait donc de souffler à des vitesses supersoniques ce qui est impossible dans ce type de soufflerie. Cette condition ne peut donc être remplie de cette manière.

Cependant, dans le cas des formes à angles vifs, le processus de décollement (couche de cisaillement) est déclenché artificiellement par la présence de coins et par suite, la distribution des pressions autour de l'obstacle est indépendante du nombre de Reynolds. Le problème de la reproduction du nombre de Reynolds ne se pose donc pas.

Pour les formes arrondies la technique consiste à "accrocher" les régimes de turbulence appropriés en augmentant artificiellement le Reynolds par l'utilisation de rugosités de surface.

La maquette de stade étudiée en soufflerie présentant des angles vifs nous n'avons pas eu recours à cet artifice.

4.2 TECHNIQUE DE MESURE DE VITESSE PAR ANÉMOMÉTRIE A FIL CHAUD

La technique de mesure de vitesse par fils chauds est dite intrusive: il faut placer la sonde dans l'écoulement à caractériser. Un fil de tungstène (Figure 75) extrêmement fin (5 microns), placé dans un pont de Wheatstone, est chauffé par effet Joule de telle sorte que sa température soit supérieure à celle du fluide. Un échange de chaleur se produit alors par convection forcée et fait varier la résistance du fil. Un courant de surchauffe rétablit de manière instantanée l'équilibre du pont. L'échange convectif étant directement lié aux propriétés physiques du fluide, à sa vitesse et à l'écart de température entre les deux milieux, on peut en déduire la vitesse d'écoulement. La fluctuation de tension aux bornes de l'élément sensible traduit donc après étalonnage la variation de vitesse. L'étalonnage s'effectue à l'aide d'une soufflerie étalon.



Figure 75 : Anémomètre à fil chaud

La rapidité de réponse de ce système (20 KHz) le rend particulièrement adapté à la mesure de la turbulence (100 à 200 Hz en soufflerie). Cette technique présente toutefois quelques inconvénients dont la difficulté à appréhender parfaitement la direction de l'écoulement et l'extrême fragilité des sondes qui rend la manipulation particulièrement délicate.

Au cours des essais paramétriques une sonde coudée type DISA dont le fil a été mis en position verticale est utilisée. Les fluctuations de la vitesse sont mesurées dans un plan perpendiculaire au fil, donc le fil vertical de la sonde utilisée mesure des fluctuations dans un plan horizontal. La sonde est placée à une distance de 4-5 mm des gradins de sorte que la vitesse moyenne et l'écart type soient mesurés au niveau des tribunes ce qui correspond environ à la hauteur d'un individu assis. Un tube de Pitot placée dans la zone centrale de la veine dans l'écoulement non perturbé à l'amont de la maquette, à 200 mètres de hauteur en vraie grandeur (66 cm à l'échelle de la maquette) représente la référence. Cette référence, prise en synchrone avec les mesures réalisées au niveau des tribunes dans la maquette du stade, permet d'adimensionner les vitesses et les écart-types mesurés. La référence permet également de vérifier périodiquement le bon fonctionnement de la sonde. La Figure 76 illustre le contrôle de la précision de mesure de la sonde : elle est placée directement à côté de tube de Pitot dans l'écoulement.

Dans le cas où on constate une différence entre les valeurs mesurées par ces deux instruments, la linéarité de cette différence est vérifiée pour toute la gamme de vitesse et un coefficient de correction est appliqué. Ce type de sonde étant particulièrement fragile (dépôt éventuel de poussière par exemple) et très sensible à la variation de température de la veine (la chaîne de mesure utilisée ici n'ayant pas de système de correction automatique de température), cette manipulation de recalage doit être répétée régulièrement.

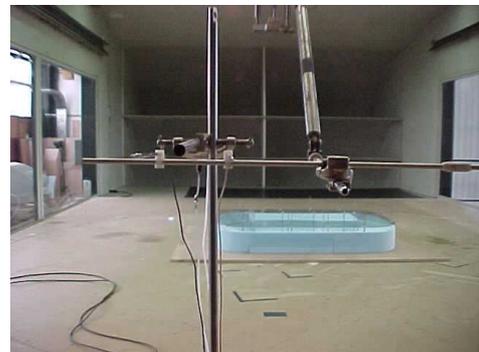


Figure 76 : Sonde placée à côté de la référence, du tube de Pitot

Le tube de Pitot de référence donne la pression dynamique moyenne, à partir de laquelle la vitesse moyenne du vent est calculée. La sonde à fil chaud mesure en continu la vitesse de l'écoulement. L'acquisition de ces données et le traitement statistique de celles-ci conduisent aux grandeurs suivantes.

- La vitesse moyenne en chaque point i (\overline{U}_i);
- L'écart type de la vitesse moyenne au point i (σ_i);

- Vitesse de pointes au point i (\hat{U}_i , \check{U}_i).

La mesure en soufflerie est complétée par la visualisation de l'écoulement. Ceci permet d'appréhender les phénomènes aérodynamiques de manière qualitative. Ainsi les zones tourbillonnaires, les zones de calme sont localisées, ce qui permet de qualifier l'écoulement dans les différentes configurations du stade.



Figure 77 : Visualisation par la fumée et sur un plan laser

5. CONCEPTION D'ANALYSE D'ENSOLEILLEMENT PAR L'HORIZONTOSCOPE

Le confort aérothermique des spectateurs est lié non seulement à l'écoulement d'air, mais aussi aux conditions d'ensoleillement. L'ensoleillement affecte non seulement le confort thermique des spectateurs, mais encore leur confort visuel.

Le critère principal de confort visuel, notamment la problématique d'ensoleillement uniforme de l'aire de jeu est abordée par un outil basé sur les principes de la géométrie solaire : l'horizontoscope. L'horizontoscope consiste en une lentille plastique transparente de la forme d'un hyperboloïde adjointe à un diagramme solaire, comme cela est illustré par la Figure 78. Il est utilisé pour déterminer la durée de la période d'ensoleillement d'un point choisi.

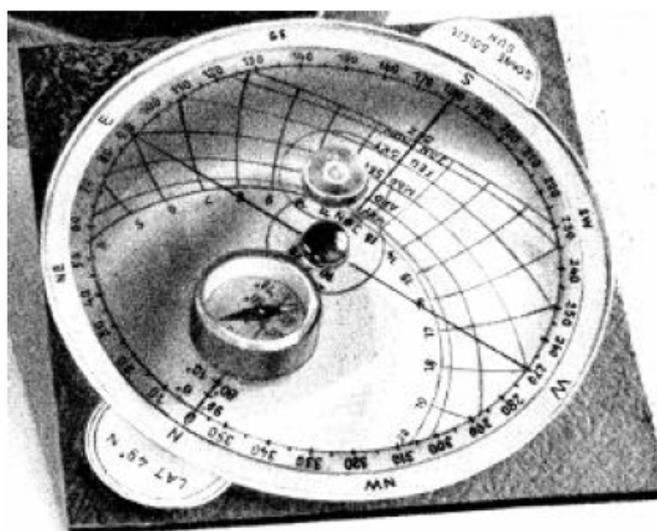


Figure 78 : L'horizontoscope

Le diagramme solaire est une projection du parcours du soleil en fonction de la localisation géographique. Parmi les différentes sortes de diagrammes solaires pour l'horizontoscope on utilise celui fait par la méthode de projection stéréographique [Olgyay, 1967].

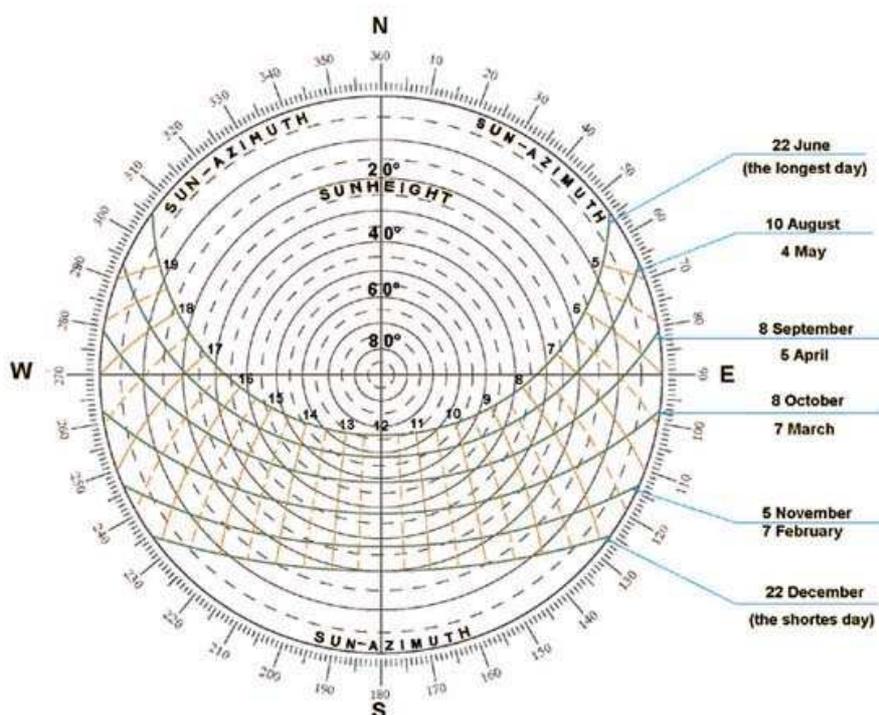


Figure 79 : Diagramme solaire

La Figure 79 montre un diagramme solaire correspondant à la latitude de 48° dans l'hémisphère Nord. Le contour circulaire du diagramme solaire correspond aux angles de l'azimut du soleil, tandis que les cercles concentriques à l'intérieur du diagramme correspondent à la hauteur du soleil. L'orientation du diagramme est marquée par les lignes des différents points cardinaux. La course du soleil projetée sur un plan horizontal est représentée par des lignes qui marquent des journées choisies sur différents mois de l'année et des lignes correspondant à des heures de la journée [Szokolay, 1996].

Quand on s'intéresse à l'ensoleillement en un point, il faut tout d'abord orienter le diagramme solaire. En suite il faut le placer au point d'intérêt. Ainsi l'image vue du point d'intérêt est projetée sur la lentille réfléchissante de l'horizontoscope. Le diagramme solaire superposé à l'image projetée sur l'horizontoscope détermine la période de l'année où le point d'intérêt est ensoleillé. Cette période de l'année est balisée par l'intersection de la course du soleil projetée sur le plan horizontal et par les contours des objets projetés sur la lentille de l'horizontoscope. En d'autres termes, le point d'intérêt est ensoleillé pendant la période de l'année qui est balisée par le contour de la fraction du ciel vue du point d'intérêt et projetée sur le diagramme solaire. La Figure 80 montre une image d'un milieu urbain projetée sur la lentille.

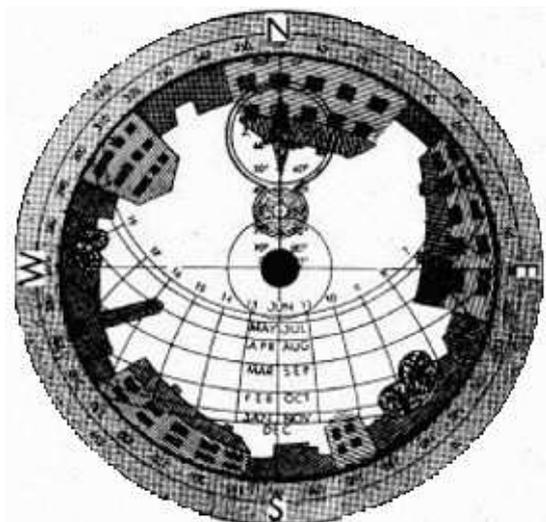


Figure 80 : Image projetée sur la lentille de l'horizontoscope

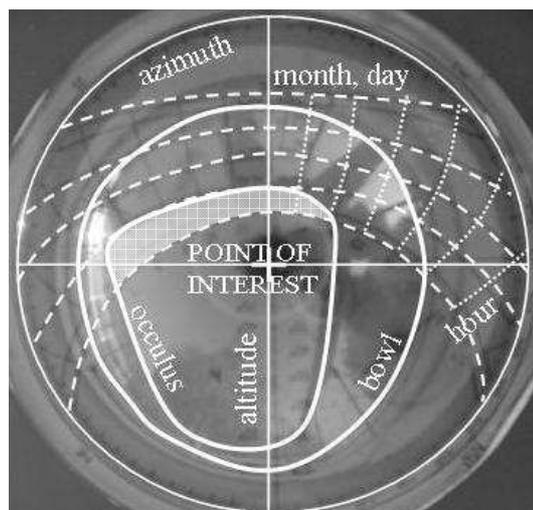


Figure 81 : L'image du stade projetée sur l'horizontoscope

En ce qui concerne l'ensoleillement de l'aire de jeu dans les stades, il est la superposition des résultats d'ensoleillement des quatre coins de l'aire de jeu. L'horizontoscope placé en ces points donne des images projetées qui se composent du contour extérieur de la toiture, du contour de l'ouverture centrale de la toiture (l'oculus) et de celui des gradins. La Figure 81 montre l'image de la maquette du stade vue d'un coin de l'aire de jeu, projetée sur la lentille. Le point d'intérêt se trouve au point central du diagramme solaire. La période de l'année pendant laquelle le point choisi est ensoleillé est balisée par l'intersection du diagramme solaire et du contour d'oculus. Sur la Figure 81 l'intersection est marquée en blanc, ce qui signifie une courte période de l'année. L'image indique que le point d'intérêt pourrait être ensoleillé pendant la période de l'année ce qui est ombrée par partie de la toiture opaque si cette dernière était de matériau transparent ou translucide. Cette partie est marquée par l'intersection du contour d'oculus, de celui des gradins et de celui du diagramme solaire.

CHAPITRE III.

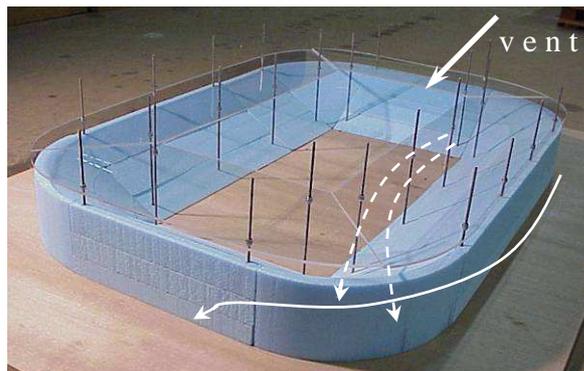
ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

Le but de ce troisième chapitre consiste à

- *démontrer que les caractéristiques morphologiques du stade ont un impact sur les caractéristiques de l'écoulement en particulier au niveau des tribunes;*
 - *mettre en évidence des corrélations entre les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes et la morphologie du stade;*
 - *analyser l'influence de la morphologie sur le confort visuel des spectateurs;*
 - *mettre en place une approche méthodologique d'évaluation de confort aérothermique des spectateurs par la transposition des résultats des essais paramétriques menés en soufflerie.*
-

1. RESULTATS DES ESSAIS PARAMETRIQUES MENES EN SOUFFLERIE

CONFIGURATION:	C1 – TOITURE HORIZONTALE						
COMPARER A :	CAS DE REFERENCE						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.54	0.28	0.85	0.52	1.57	7.02	1.57
Longitudinale	0.50	0.29	0.74	0.58	1.48	1.56	4.68
Transversale	0.48	0.25	0.76	0.52	1.58	10.83	1.39

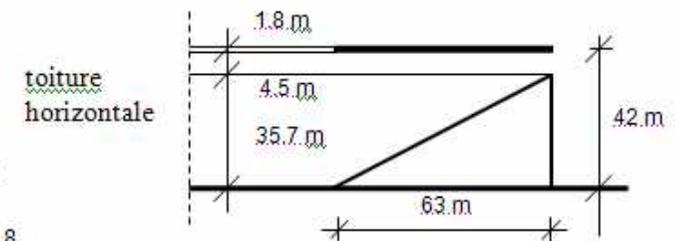
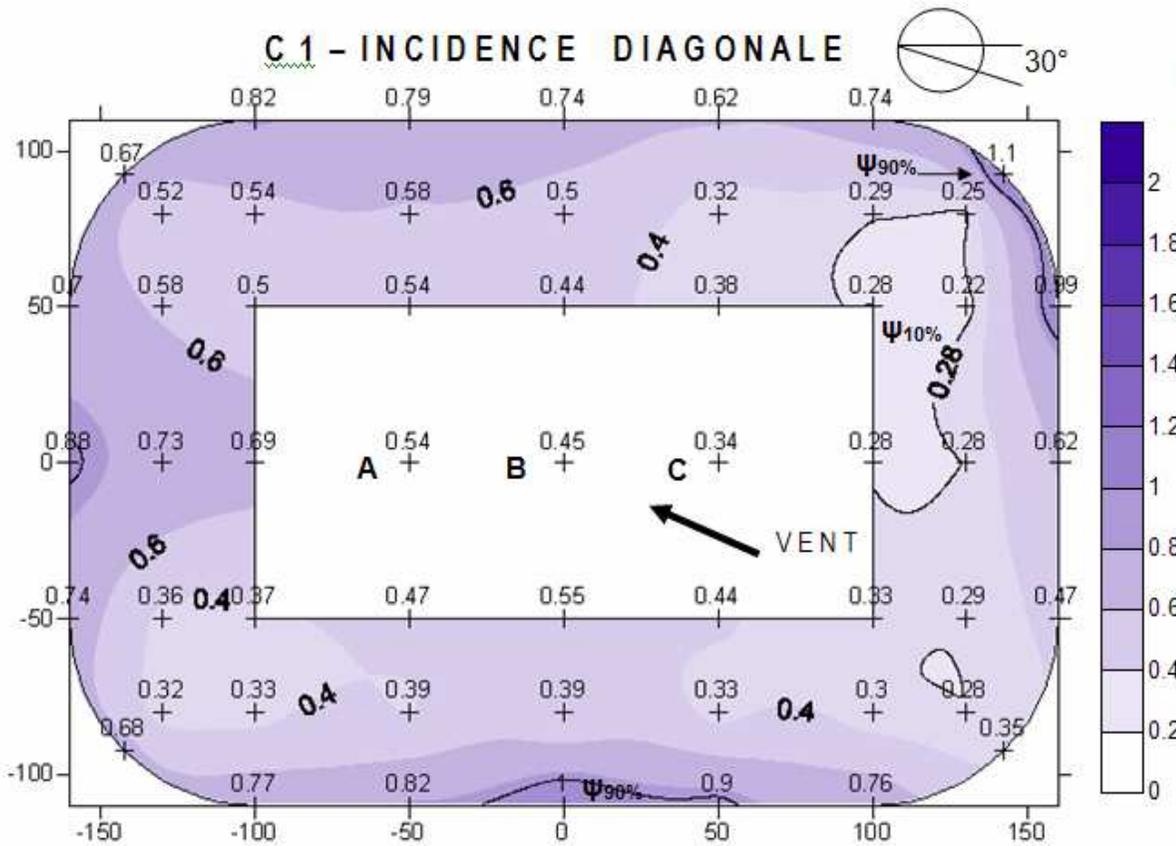


Description : Cette configuration représente le cas de référence : les configurations suivantes seront comparées à celle-ci. Elle comporte une toiture horizontale qui couvre intégralement les gradins et en est séparée par une brèche horizontale de hauteur 4.5 mètres.

Le vent d'incidence longitudinale induit des accélérations au niveau des parties hautes des gradins sous le vent. Ces zones sont décalées vers les angles en raison de l'effet de dépression induit par le contournement de l'écoulement. Les zones de calme se trouvent aux parties basses des gradins sous le vent.

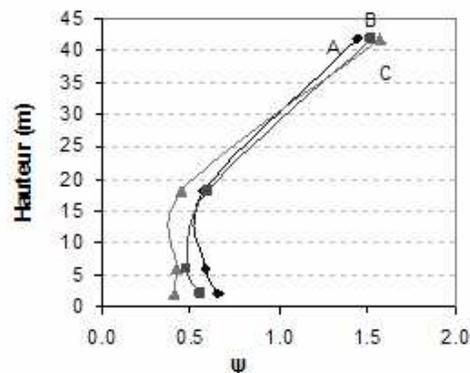
Résultats : Le vent d'incidence transversale implique des accélérations au niveau des parties hautes des gradins au vent. Ces zones sont décalées vers les virages en raison de l'écoulement incident qui contourne le stade. Les zones très ventilées apparaissent également au niveau des parties hautes des gradins sous le vent. Cette configuration ne montre pas une grande sensibilité à l'incidence par rapport aux valeurs de $\bar{\Psi}$ et à l'indices d'homogénéité IH 10% et IH 90%. Les zones de forte ventilation sont relativement réduites et se trouvent au niveau des parties hautes des gradins au vent et sous le vent. L'ampleur de ces zones d'accélération et le risque d'inconfort aérothermique pourraient être réduits par l'emploi de brise-vent.

Les zones de calme se trouvent au niveau des parties basses des tribunes au vent. Les spectateurs placés dans ces endroits pourraient être exposés au rayonnement solaire direct, en fonction de la position du soleil. Un important rayonnement direct couplé à un manque de ventilation peut induire des conditions sévères du point de vue du confort thermique pendant les périodes chaudes. Néanmoins, ces spectateurs éloignés de la toiture ne sont pas exposés au rayonnement de grande longueur d'onde émis par ce dernier, compte tenu de la distance importante.

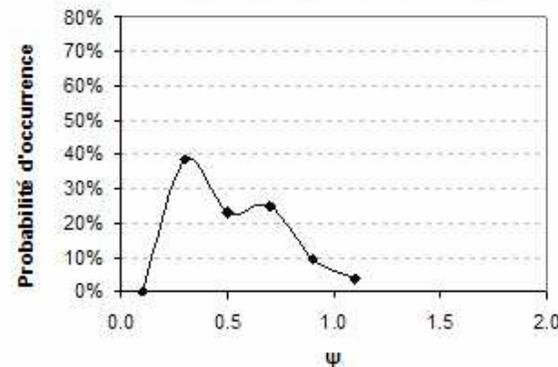


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.54
$\sigma:$	0.23
$\Psi_{10\%}:$	0.28
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3290
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	7.02
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.52
$\Psi_{90\%}:$	0.85
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	671
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	1.57
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.57

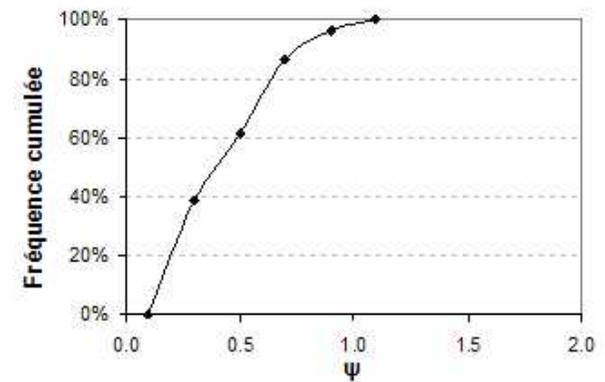
C 1 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



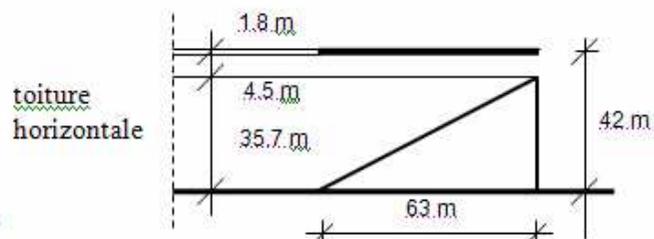
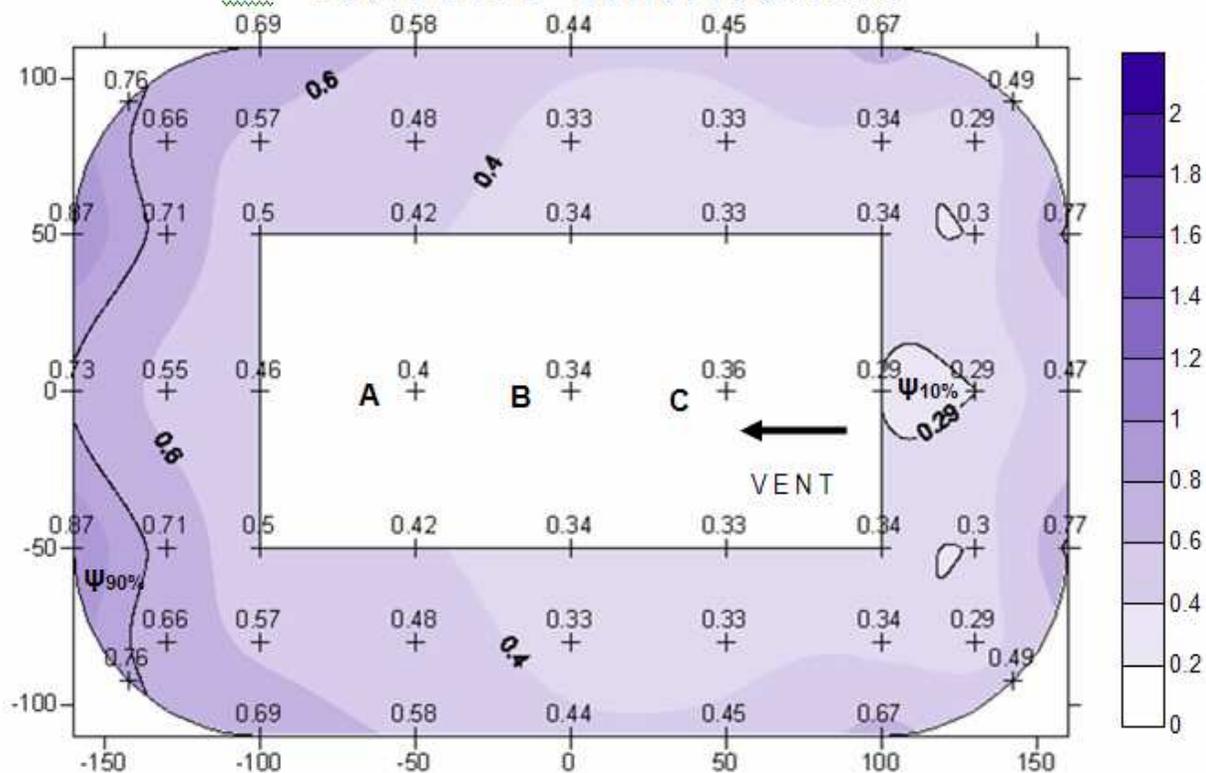
C 1 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 1 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

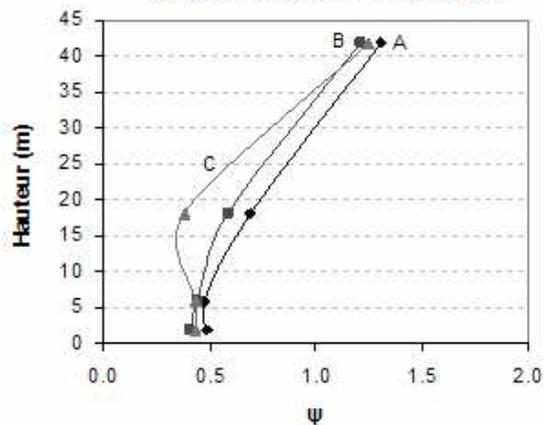


C 1 - INCIDENCE LONGITUDINALE

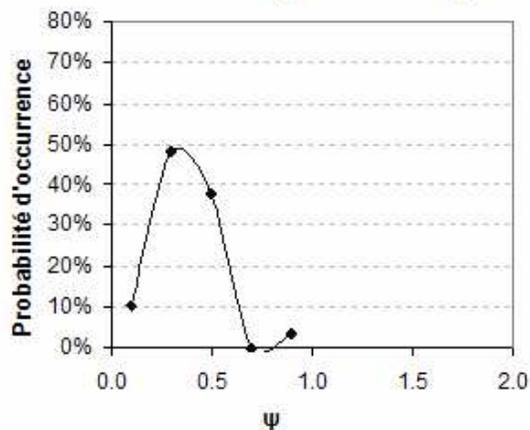


$A_{\text{totale}} [\text{m}^2]:$	54889
$\bar{\Psi} :$	0.50
$\sigma :$	0.17
$\Psi_{10\%} :$	0.29
$A_{\Psi_{10\%}} [\text{m}^2]:$	856
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{\text{totale}} :$	1.56
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi} :$	0.58
$\Psi_{90\%} :$	0.74
$A_{\Psi_{90\%}} [\text{m}^2]:$	2569
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{\text{totale}} :$	4.68
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi} :$	1.48

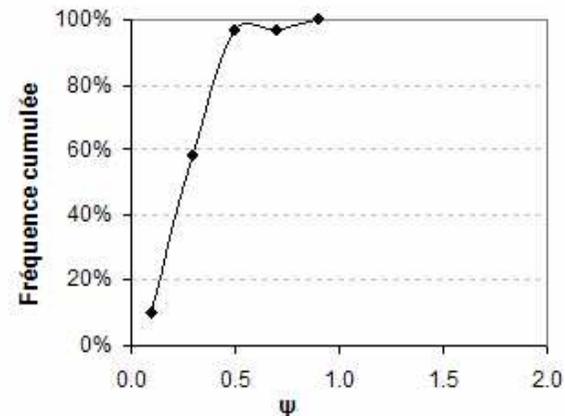
C 1 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



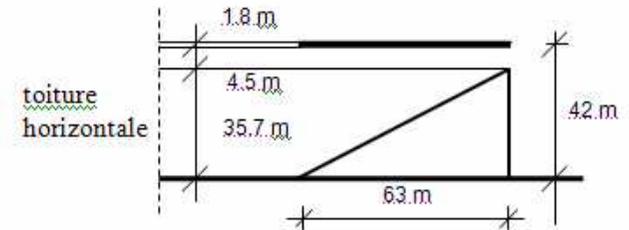
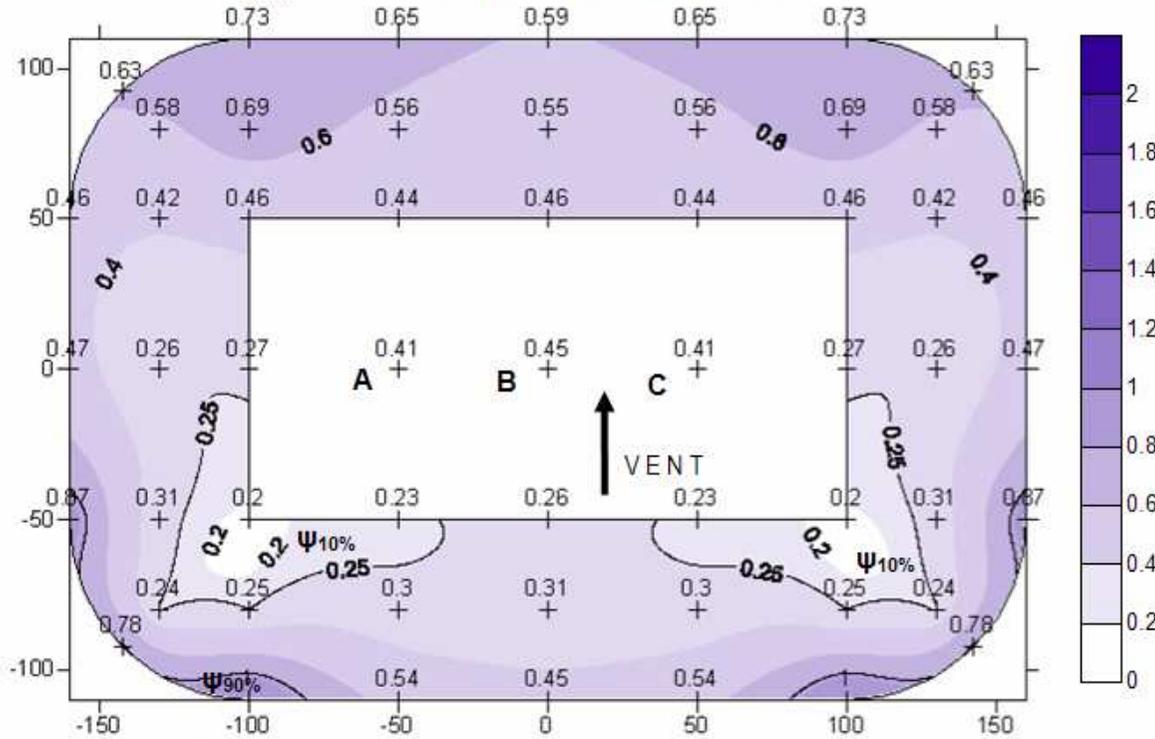
C 1 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 1 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

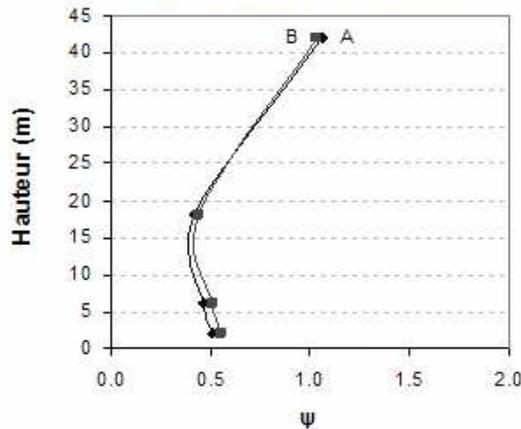


C 1 - INCIDENCE TRANSVERSALE

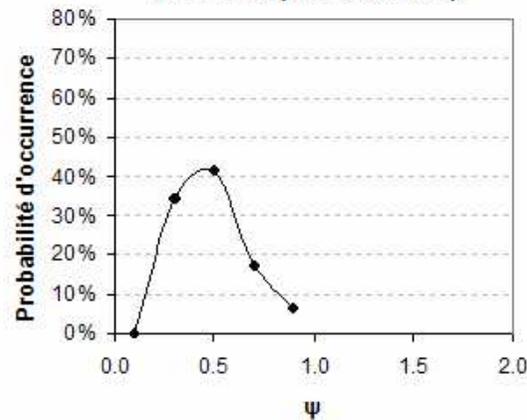


A_{total} [m ²]:	54889
$\bar{\Psi}$:	0.48
σ :	0.21
$\Psi_{10\%}$:	0.25
$A_{\Psi_{10\%}}$ [m ²]:	5945
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{total}$:	10.83
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}$:	0.52
$\Psi_{90\%}$:	0.76
$A_{\Psi_{90\%}}$ [m ²]:	761
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{total}$:	1.39
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}$:	1.58

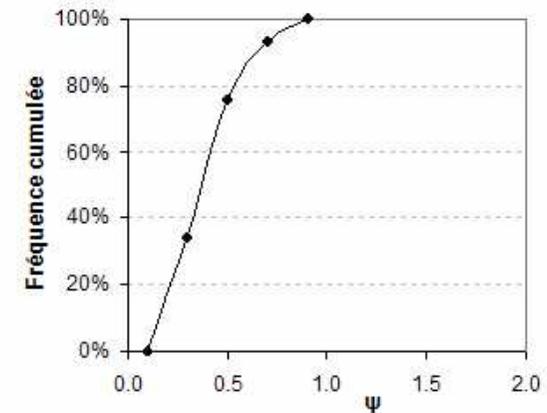
C 1 - incidence transverse; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



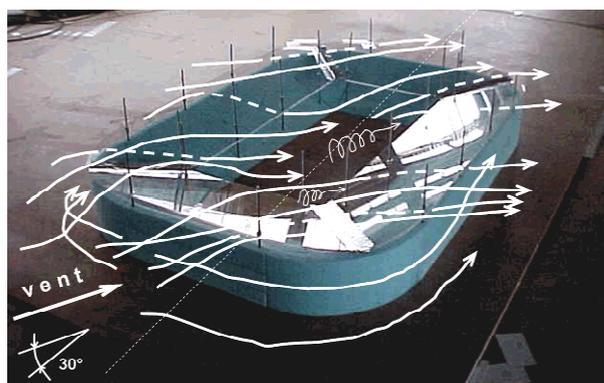
C 1 - incidence transverse; Densité de probabilité de ψ



C 1 - incidence transverse; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C2 – TOITURE DESCENDANTE DE 15° VERS L'AIRE DE JEU						
COMPARER A :	C1, C3, C11						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH10%	IH90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.68	0.41	0.98	0.60	1.44	6.58	2.42
Longitudinale	0.69	0.40	0.97	0.58	1.41	6.12	4.77
Transversale	0.62	0.40	0.98	0.65	1.58	3.64	3.59



Description : Cette configuration possède une toiture inclinée à 15 degrés : elle descend vers l'aire de jeu. Elle couvre intégralement les gradins et en est séparée par une brèche horizontale de hauteur 4.5 mètres.

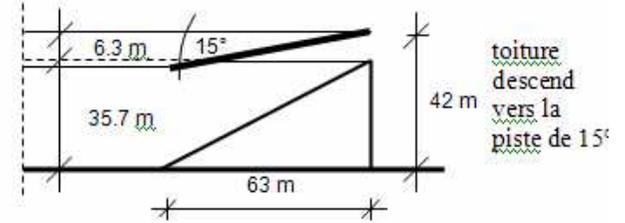
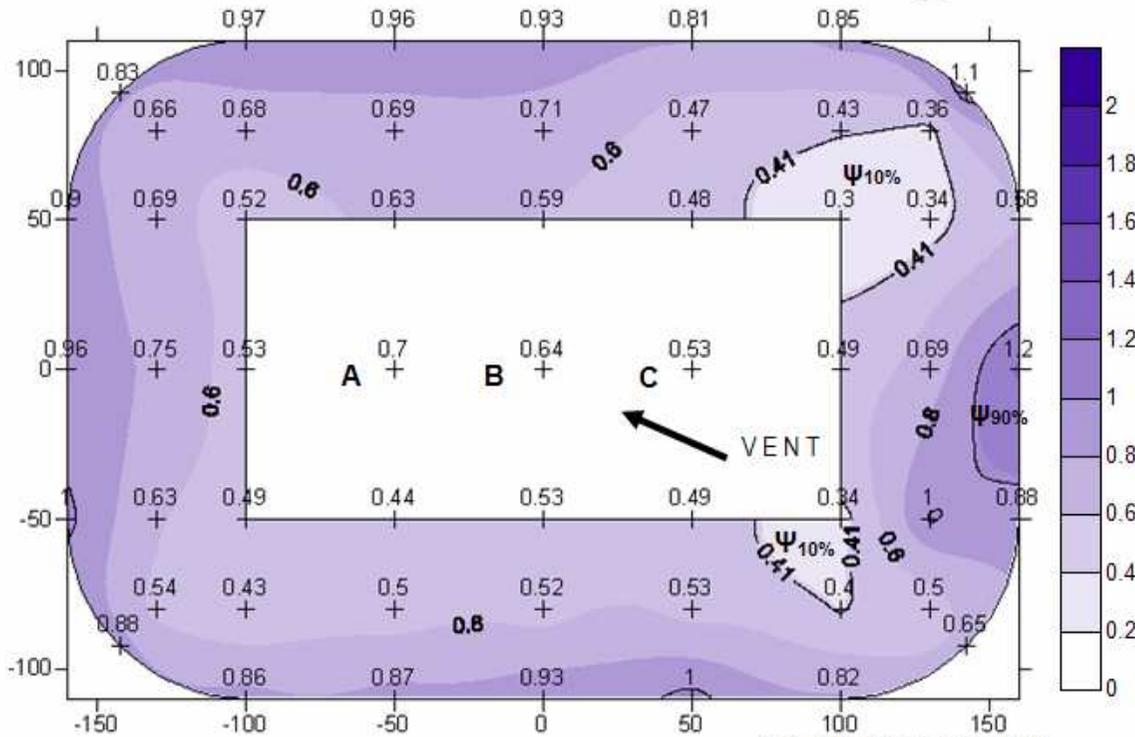
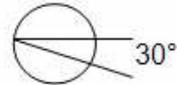
Résultats : Le vent d'incidence diagonale génère des accélérations au niveau des parties hautes des gradins au vent. L'écoulement rentrant dans le stade entre la toiture et les gradins est dévié vers les angles par le flux qui contourne le stade. Les zones de calme se situent dans la partie basse des angles au vent.

Les vents d'incidences longitudinale et transversale donnent des résultat semblables à ceux de l'incidence diagonale : des zones d'accélération et de calme se trouvent à des endroits équivalents par rapport à l'incidence du vent. Cependant, pour l'incidence transversale de nouvelles zones de calme se créent au niveau des virages sous le vent. Pour l'incidence longitudinale elles apparaissent au niveau des parties centrales des tribunes latérales.

Globalement une toiture descendante vers l'aire de jeu accroît l'écoulement au niveau de l'intégralité des gradins. Cela est indiqué par la croissance des valeurs de $\bar{\Psi}$, $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$. **En raison de la position de la toiture un effet "collecteur" se développe : le flux est conduit vers les gradins. De plus, la section de passage du flux est réduite en raison du rapprochement de la toiture et des gradins.**

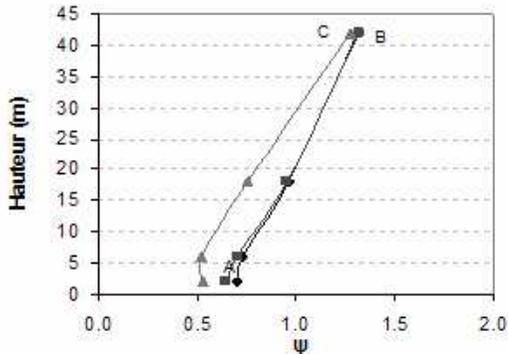
Cette configuration ne montre pas de sensibilité importante par rapport à l'incidence du vent : les valeurs de $\bar{\Psi}$, $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ ne varient que légèrement avec l'incidence. L'écoulement est légèrement plus homogène que celui de la première configuration, en particulier au niveau des tribunes sous le vent.

C 2 - INCIDENCE DIAGONALE

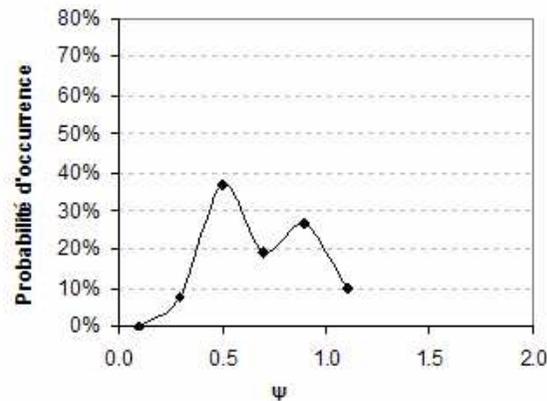


$A_{\text{totale}} [\text{m}^2]:$	54889
$\bar{\Psi} :$	0.68
$\sigma:$	0.23
$\Psi_{10\%} :$	0.41
$A_{\Psi_{10\%}} [\text{m}^2]:$	3614
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{\text{totale}} :$	6.58
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi} :$	0.60
$\Psi_{90\%} :$	0.98
$A_{\Psi_{90\%}} [\text{m}^2]:$	1329
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{\text{totale}} :$	2.42
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi} :$	1.44

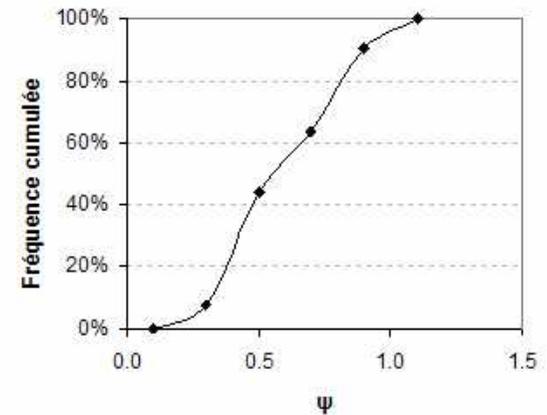
C 2 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



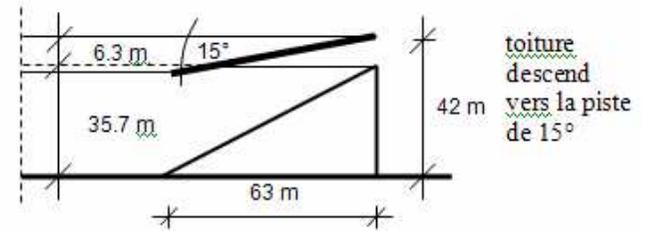
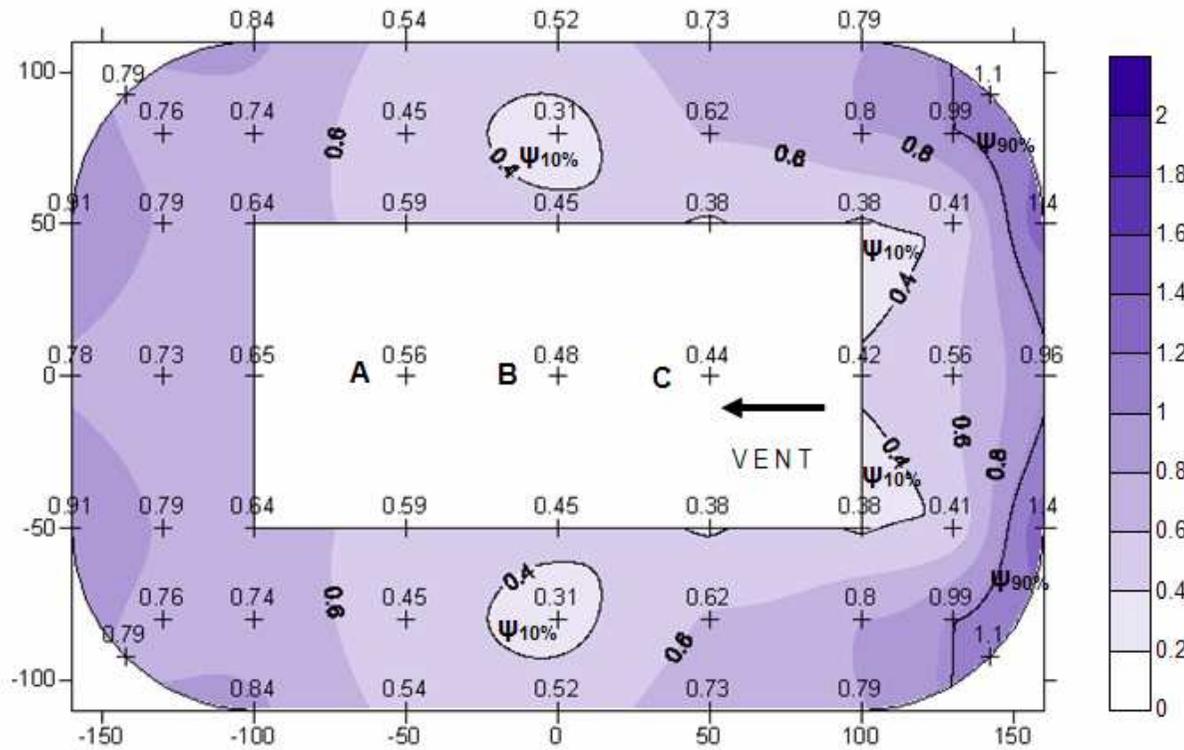
C 2 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 2 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

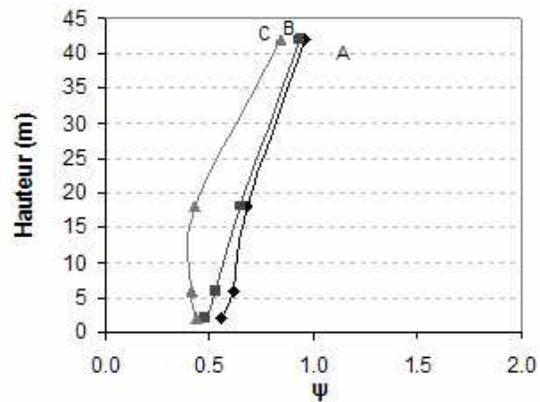


C 2 - INCIDENCE LONGITUDINALE

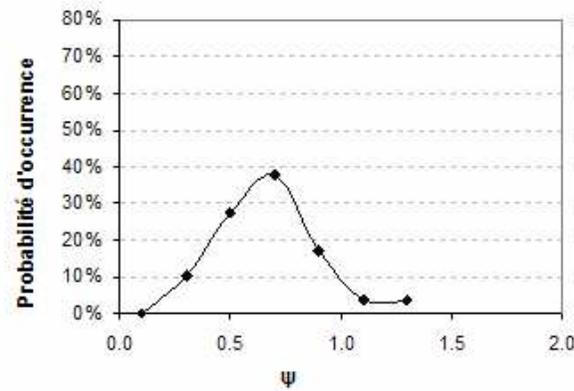


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.69
$\sigma:$	0.24
$\Psi_{10\%}:$	0.40
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3358
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	6.12
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.58
$\Psi_{90\%}:$	0.97
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	2620
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	4.77
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.41

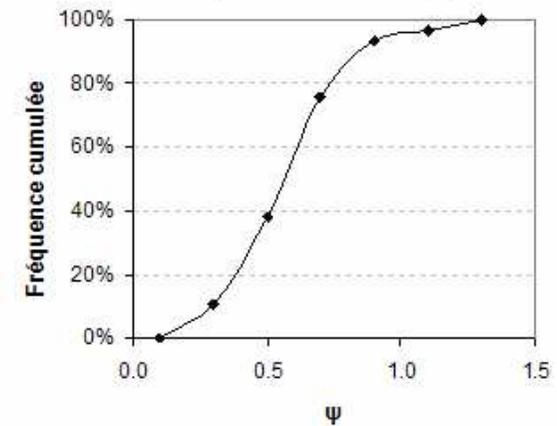
C 2 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



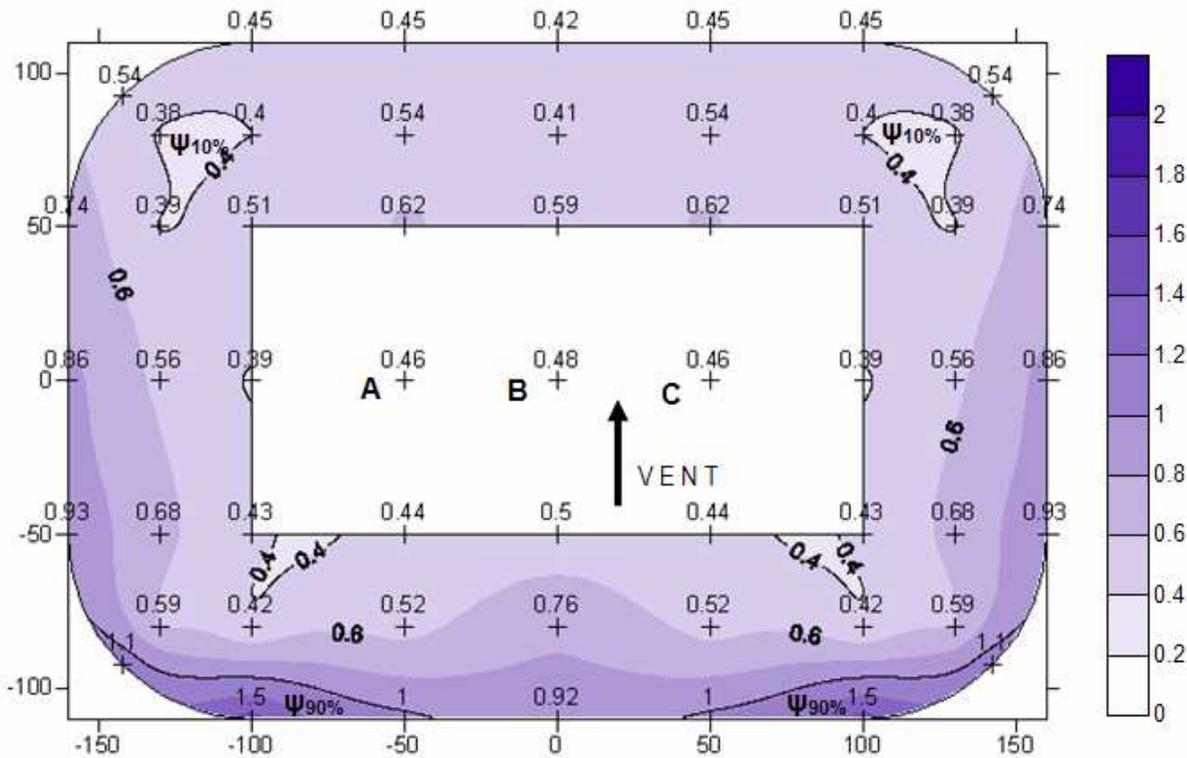
C 2 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 2 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

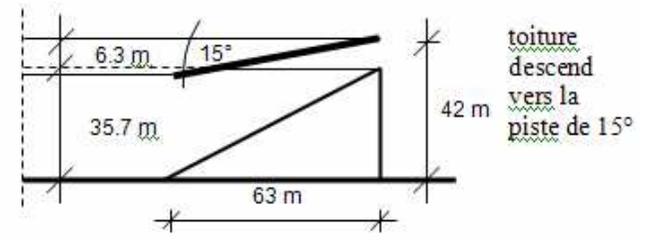


C 2 - INCIDENCE TRANSVERSALE



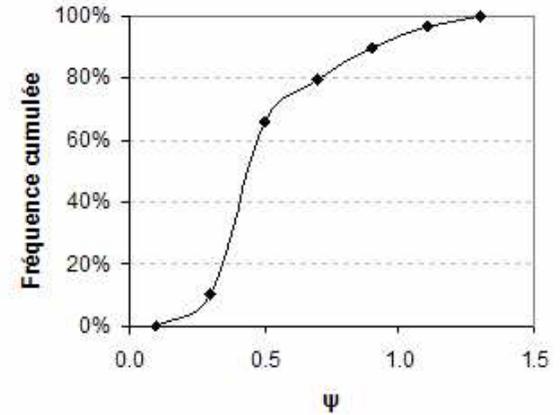
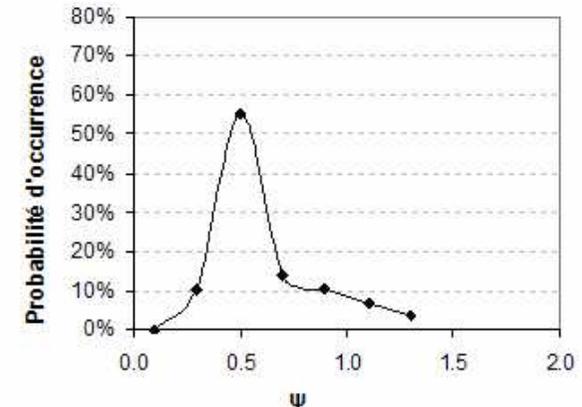
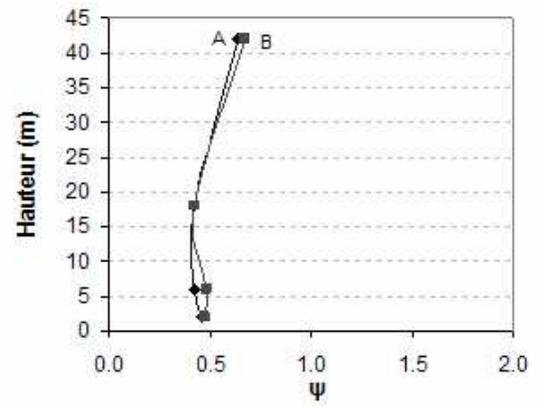
C 2 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu

C 2 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ

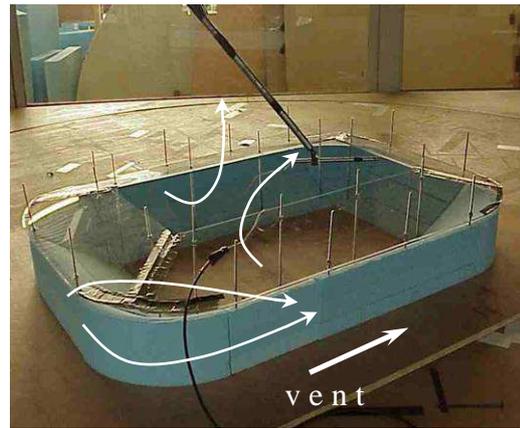
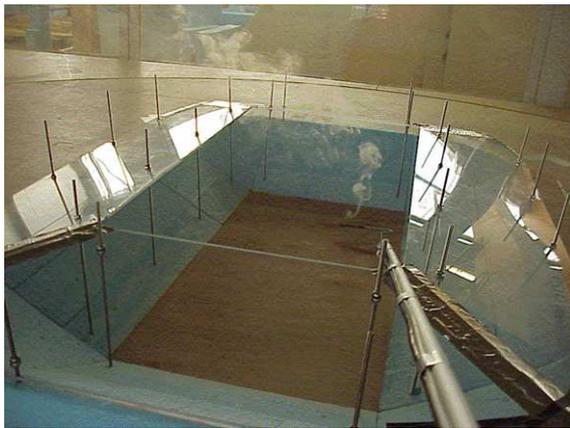


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.62
$\sigma:$	0.26
$\Psi_{10\%}:$	0.40
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	2000
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	3.64
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.65
$\Psi_{90\%}:$	0.98
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1969
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	3.59
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.58

C 2 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C3 – TOITURE MONTANTE DE 15° VERS L'AIRE DE JEU						
COMPARER A :	C1, C2, C11						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.61	0.30	1.19	0.49	1.95	8.85	2.39
Longitudinale	0.51	0.24	0.81	0.47	1.59	8.76	0.13
Transversale	0.52	0.27	0.91	0.52	1.75	5.26	0.93



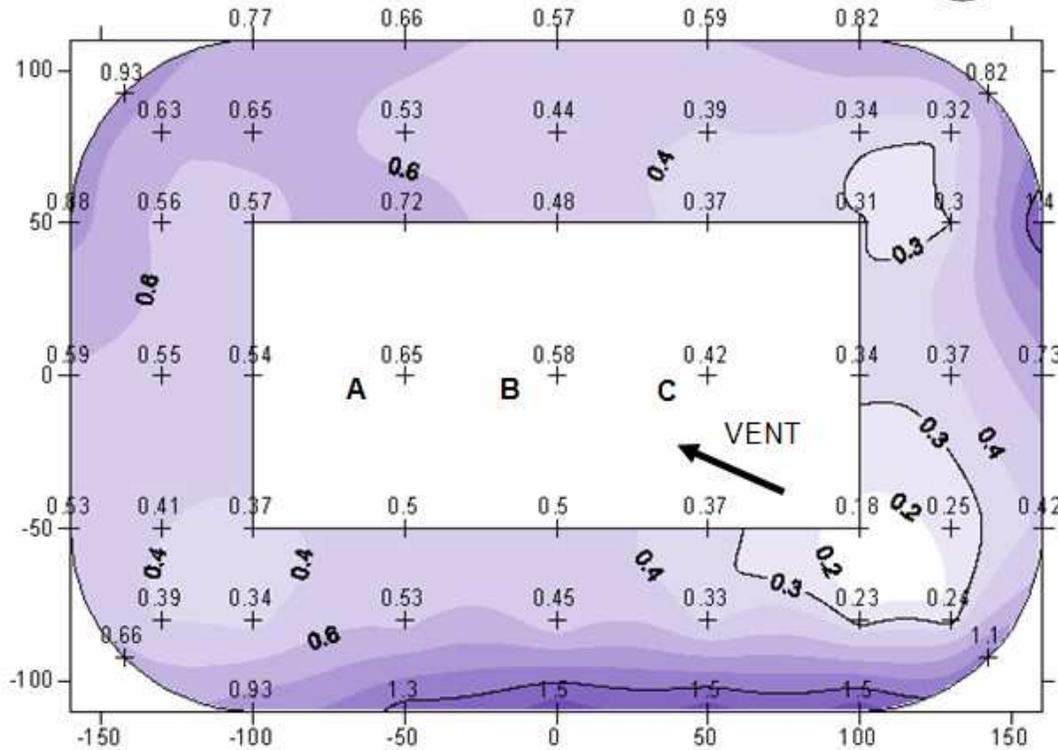
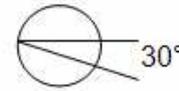
Description : Cette configuration possède une toiture qui est inclinée à 15 degrés : elle monte vers l'aire de jeu. Elle couvre l'intégralité des gradins et en est séparée par une brèche horizontale d'une hauteur de 4.5 mètres.

Résultats : Le vent d'incidence diagonale induit des accélérations au niveau des parties hautes des gradins au vent et des gradins latéraux. On observe un emplacement identique de ces zones par rapport à l'incidence du vent pour les directions longitudinale et transversale. De plus, pour l'incidence transversale les zones d'accélération se trouvent à proximité des angles des gradins au vent. Cela est dû à la dépression induite par l'écoulement de contournement. L'écoulement rentrant par la brèche entre la toiture et les tribunes au vent, se dirige vers les angles et s'échappe à travers la brèche comprise entre la toiture et les tribunes latérales.

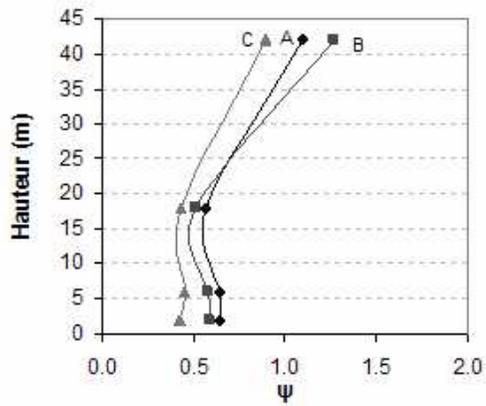
On a également observé un échappement important vers le haut de la "cavité" formée par les tribunes et la toiture du stade, qui est une zone fortement dépressionnaire.

Cette configuration montre une variation des valeurs de $\bar{\Psi}$, $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ avec l'incidence du vent et une hétérogénéité plus importante que la première configuration.

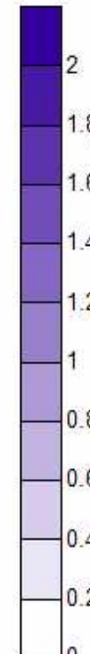
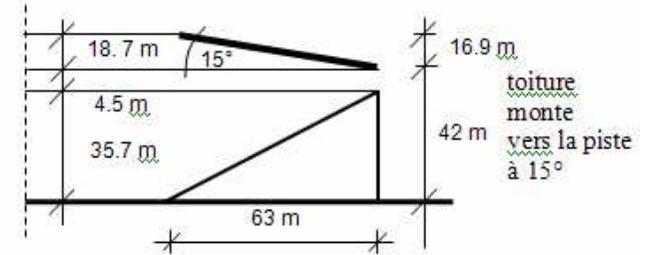
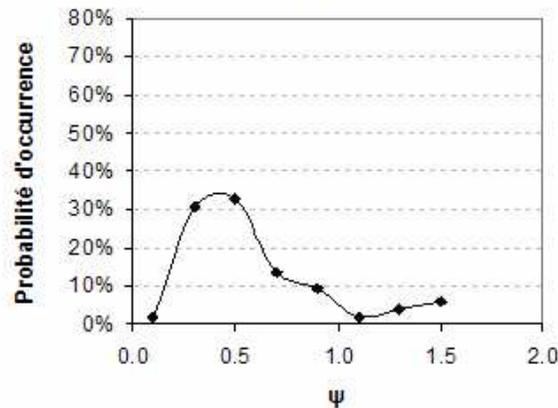
C 3 - INCIDENCE DIAGONALE



C 3 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu

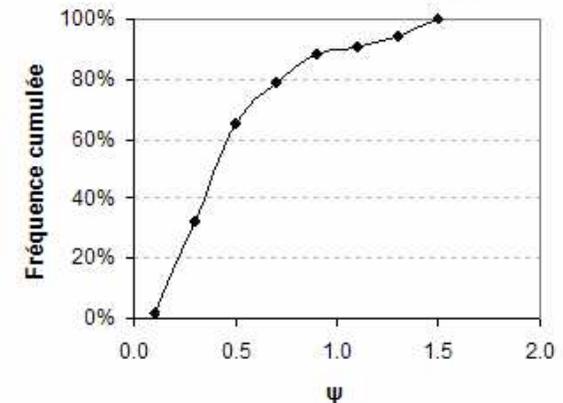


C 3 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ

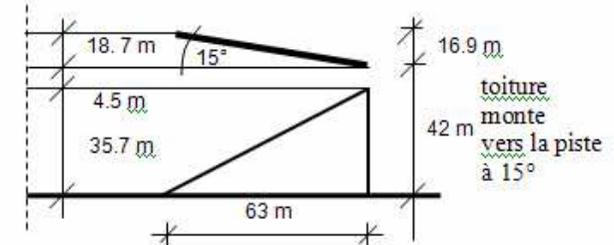
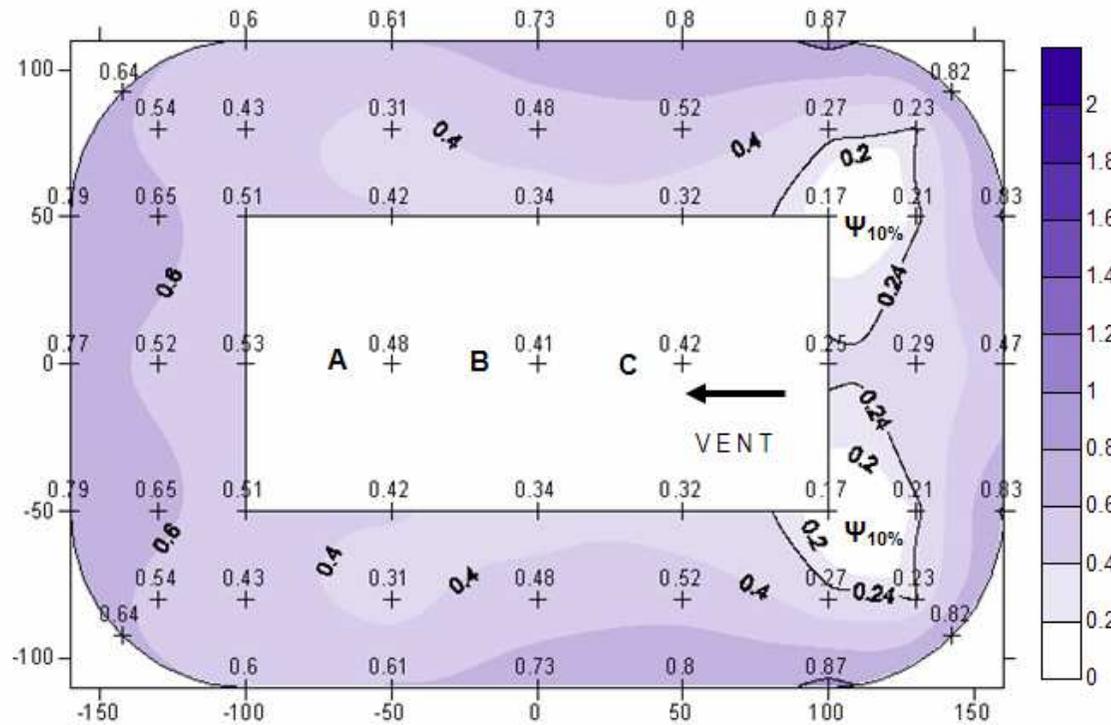


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.61
$\sigma:$	0.34
$\Psi_{10\%}:$	0.30
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	4858
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	8.85
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.49
$\Psi_{90\%}:$	1.19
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1314
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	2.39
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.95

C 3 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

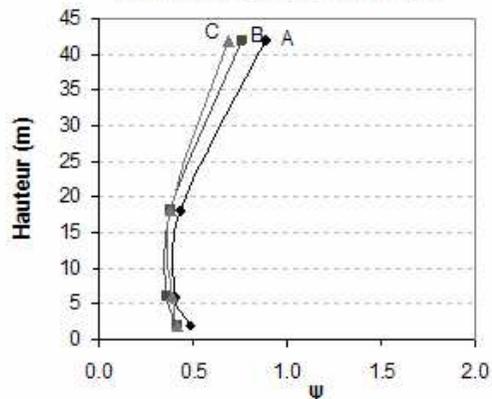


C 3 - INCIDENCE LONGITUDINALE

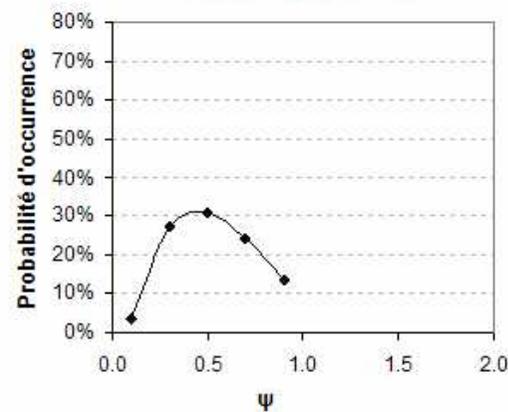


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.51
$\sigma:$	0.21
$\Psi_{10\%}:$	0.24
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	4809
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	8.76
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.47
$\Psi_{90\%}:$	0.81
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	69
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	0.13
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.59

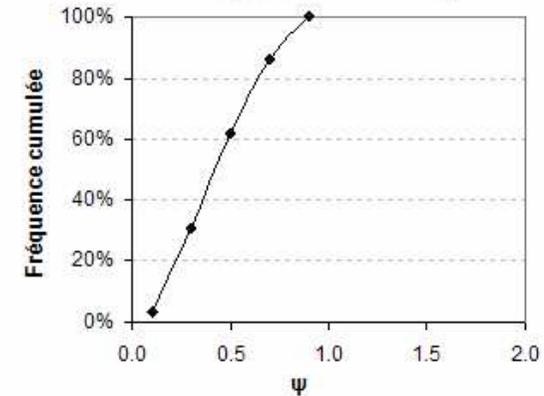
C 3 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



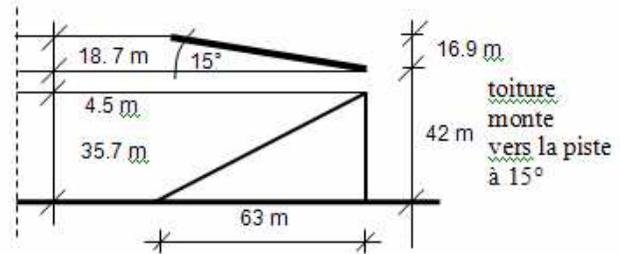
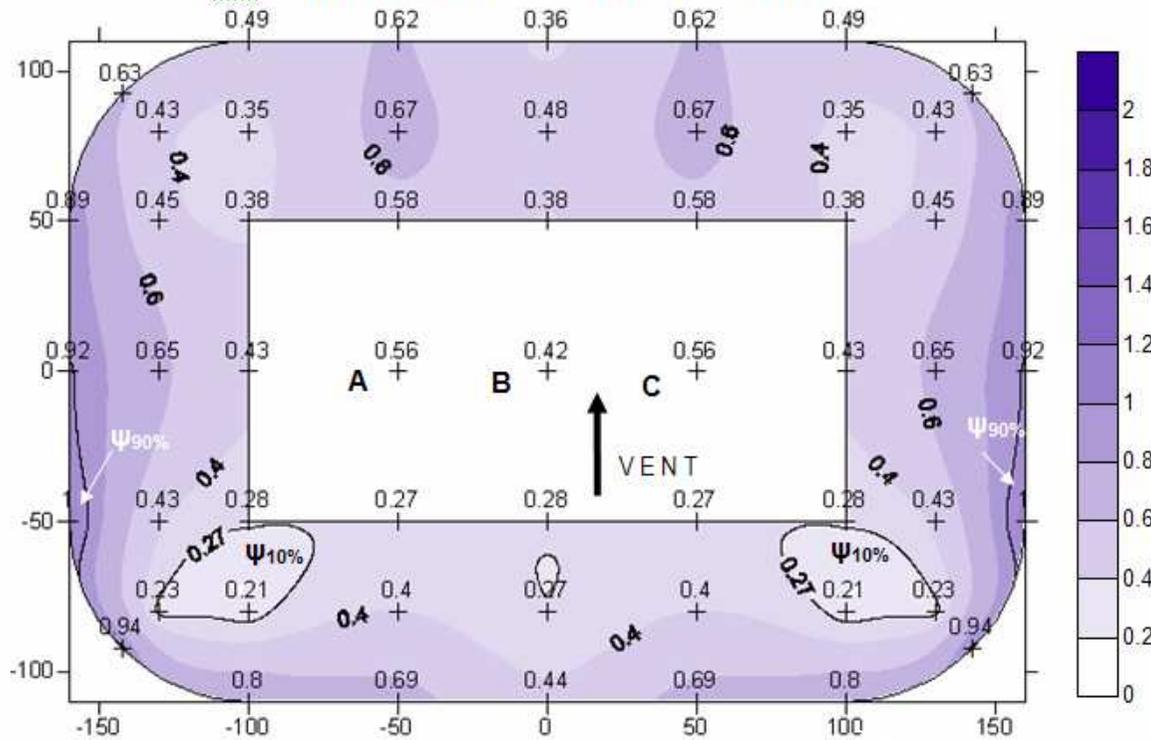
C 3 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de Ψ



C 3 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

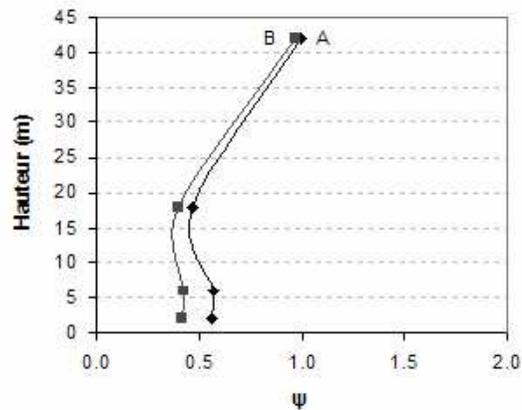


C 3 - INCIDENCE TRANSVERSALE

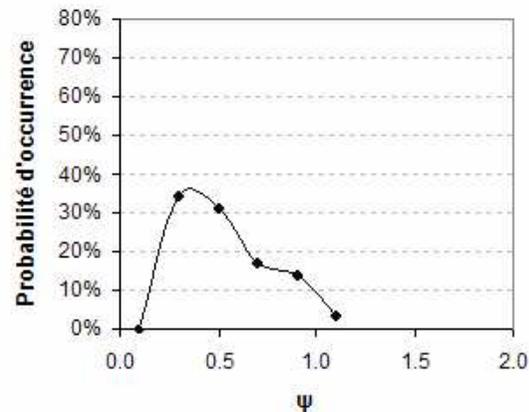


$A_{\text{totale}} [\text{m}^2]:$	54889
$\bar{\Psi} :$	0.52
$\sigma:$	0.23
$\Psi_{10\%} :$	0.27
$A_{\Psi_{10\%}} [\text{m}^2]:$	2887
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{\text{totale}} :$	5.26
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi} :$	0.52
$\Psi_{90\%} :$	0.91
$A_{\Psi_{90\%}} [\text{m}^2]:$	510
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{\text{totale}} :$	0.93
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi} :$	1.75

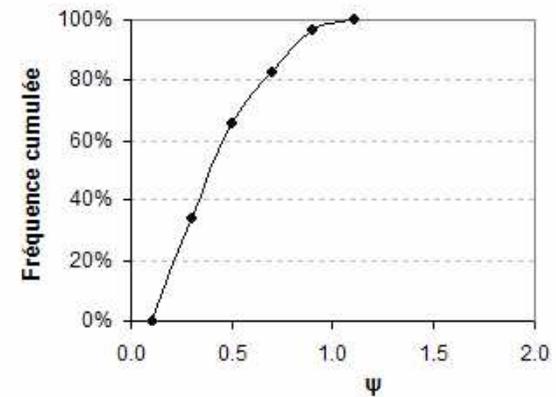
C 3 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



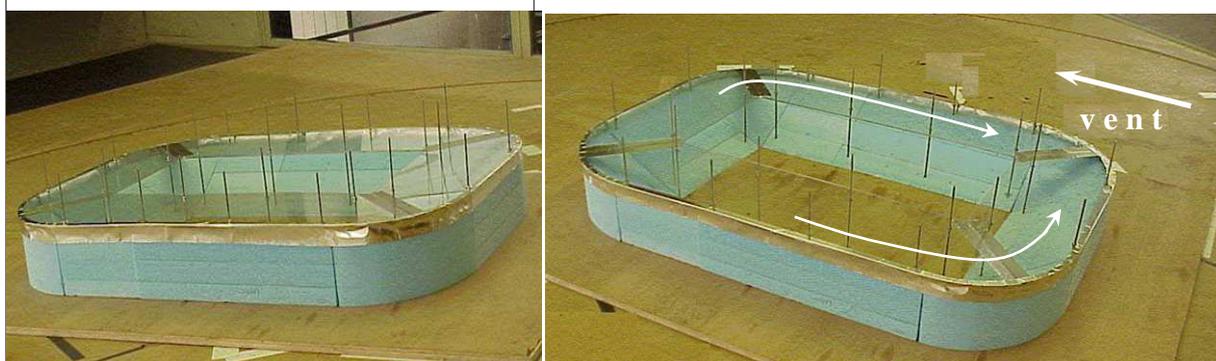
C 3 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 3 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C4 – FACADE FERMEE (SANS BRECHES)						
COMPARER A :	CAS DE REFERENCE, C4BIS, C8						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.41	0.28	0.60	0.68	1.46	0.44	3.46
Longitudinale	0.37	0.25	0.49	0.68	1.32	8.76	10.13
Transversale	0.40	0.26	0.62	0.65	1.55	6.11	3.47



Description : La brèche horizontale qui sépare les tribunes de la toiture est bouchée, ainsi la façade ne comporte pas d'ouverture. En conséquence **la porosité** de la façade égale à zéro. Dans ce contexte la porosité signifie le rapport entre la surface des ouvertures et la surface totale de façade. La toiture est horizontale et couvre l'intégralité des gradins.

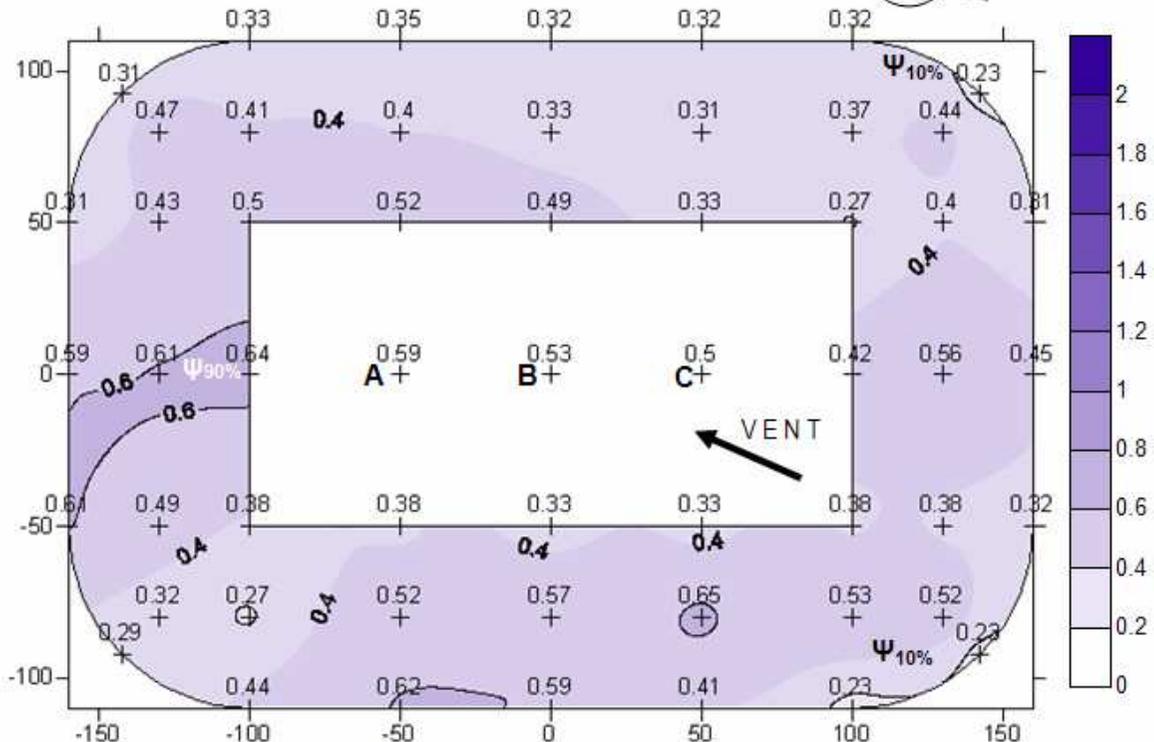
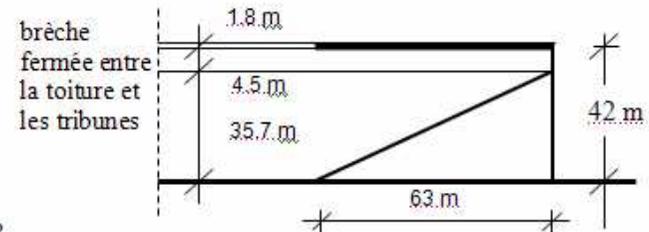
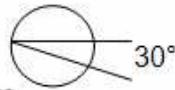
Résultats : **Le vent d'incidence diagonale induit des accélérations au niveau des gradins sous le vent.** La figure au-dessus illustre qu'à cet endroit **l'écoulement est redirigé vers les zones dépressionnaires** qui se trouvent au niveau des parties basses des tribunes au vent. En conséquence, on observe des valeurs de Ψ importantes, même en partie haute des tribunes. Les zones de calme se trouvent aux niveaux de parties hautes des tribunes latérales relatives à l'incidence du vent, au vent. Le vent d'incidence longitudinale suscite des accélérations au niveau des parties hautes des gradins sous le vent. Les zones de calme sont réduites et se trouvent aux niveaux de parties hautes des angles (ou virages) au vent.

Le vent d'incidence transversale fait accélérer l'écoulement au niveau des parties basses des tribunes sous le vent. Les zones de calme se trouvent au niveau de parties hautes des gradins au vent.

Cette configuration ne montre pas une grande sensibilité à l'incidence par rapport aux valeurs de $\bar{\Psi}$, de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ et en conséquence ni aux valeurs des indices d'homogénéité, IH 10% et IH 90%. L'écart type de population de valeurs de Ψ sont réduites environ 40% pour chaque incidence par rapport au cas de référence (C1), ce qui indique une homogénéité des données plus importante.

Les valeurs de $\bar{\Psi}$ sont réduites par environ 20% par rapport à celles du cas de référence (C1). Cela signifie que **le caractère "protecteur" du stade a augmenté par l'élimination des brèches entre la toiture et les tribunes.**

C 4 - INCIDENCE DIAGONALE

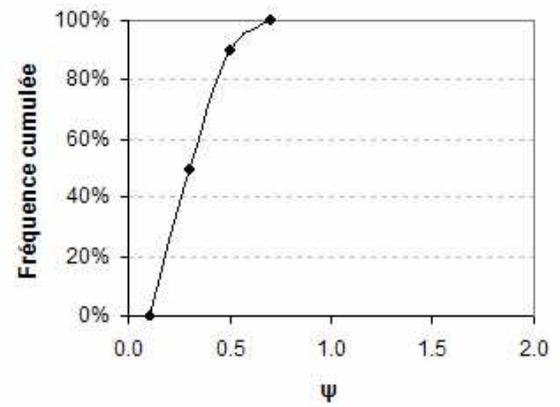
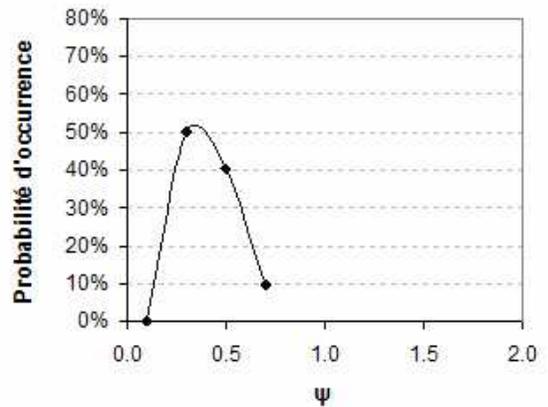
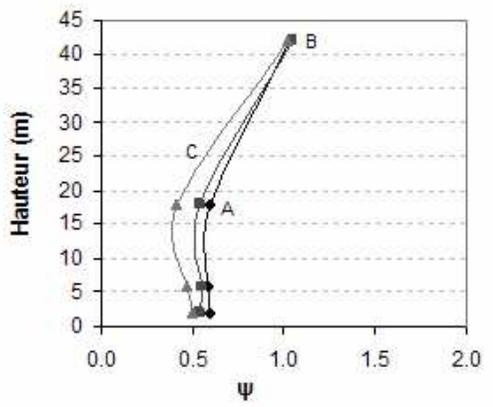


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.41
$\sigma:$	0.12
$\Psi_{10\%}:$	0.28
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	243
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	0.44
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.68
$\Psi_{90\%}:$	0.60
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1897
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	3.46
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.46

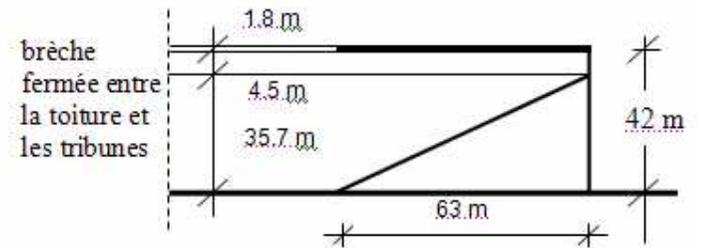
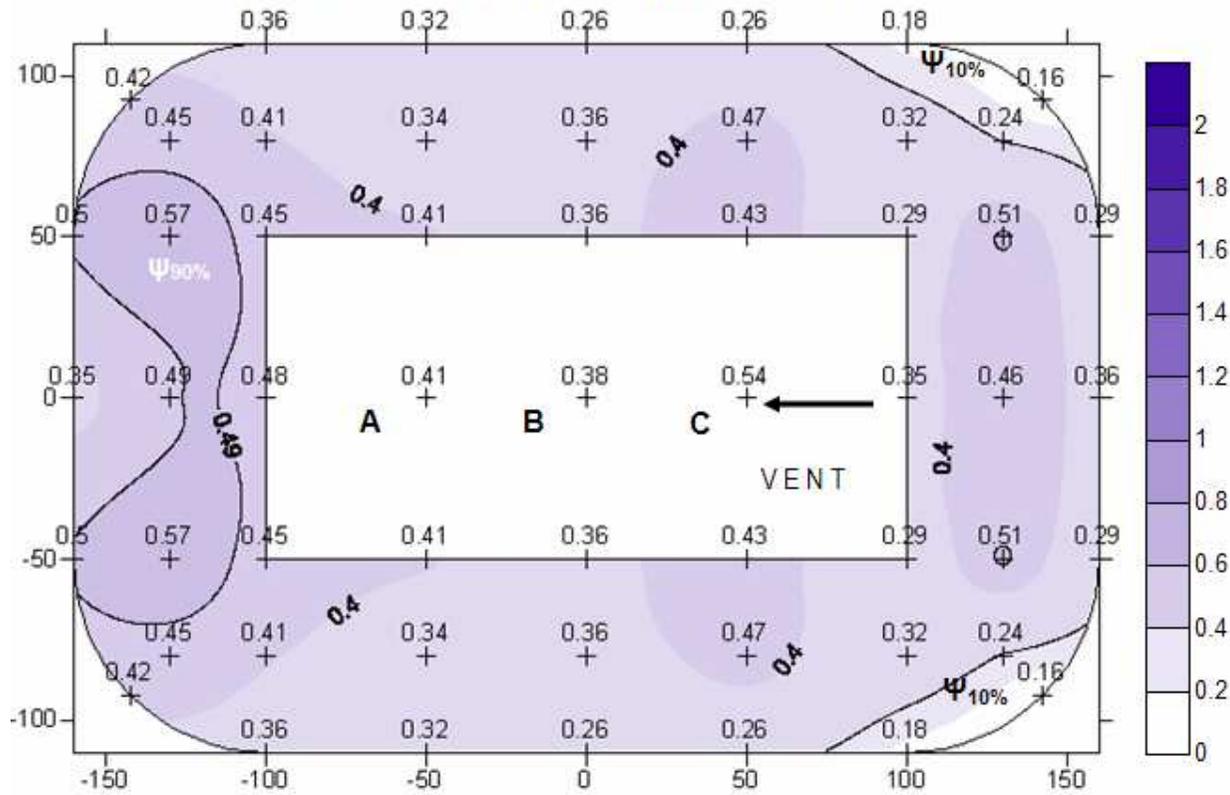
C 4 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu

C 4 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ

C 4 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

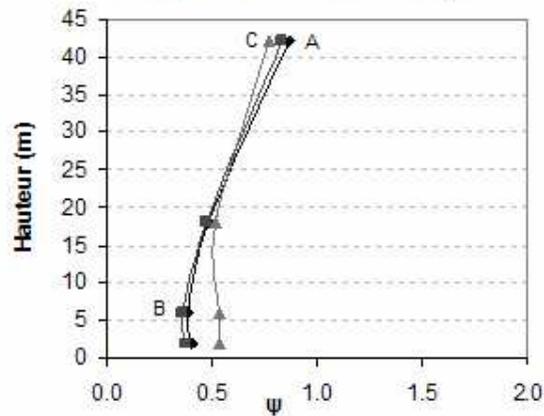


C 4 - INCIDENCE LONGITUDINALE

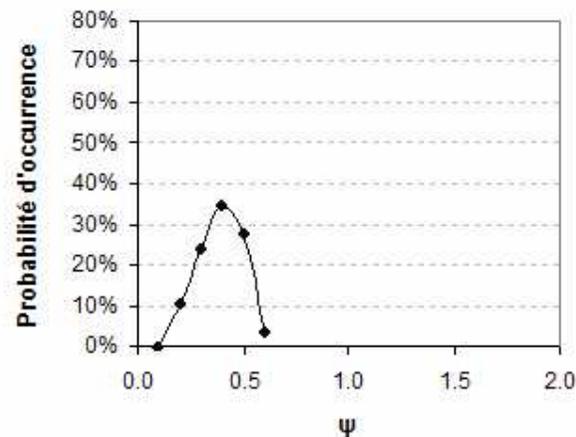


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.37
$\sigma:$	0.10
$\Psi_{10\%}:$	0.25
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	4809
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	8.76
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.68
$\Psi_{90\%}:$	0.49
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	5563
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	10.13
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.32

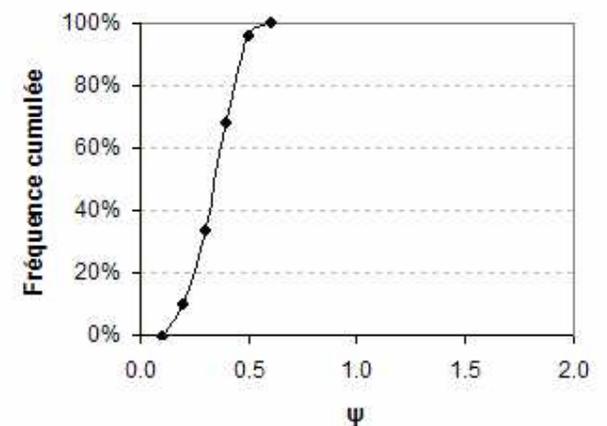
C 4 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



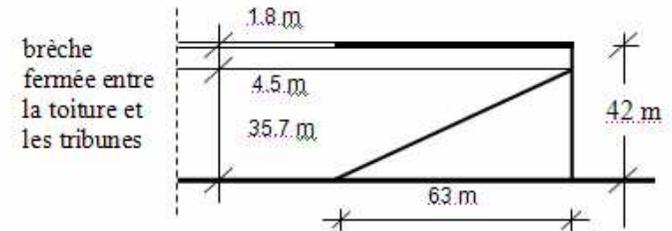
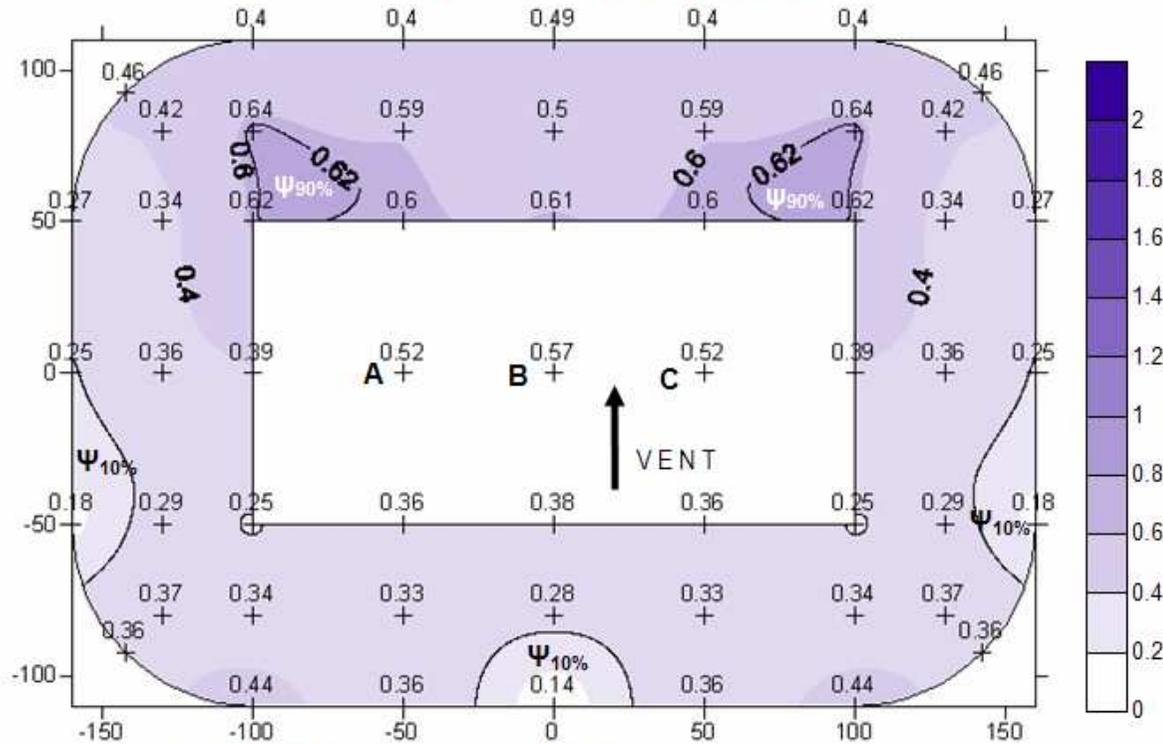
C 4 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 4 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

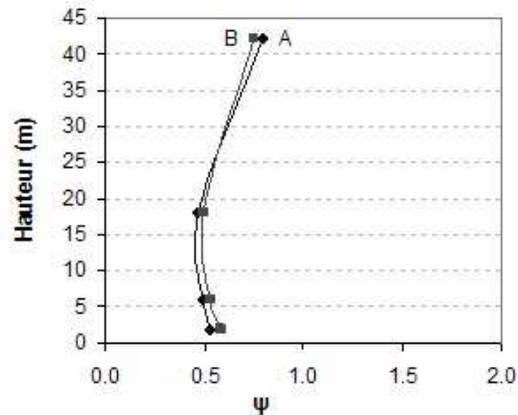


C 4 - INCIDENCE TRANSVERSALE

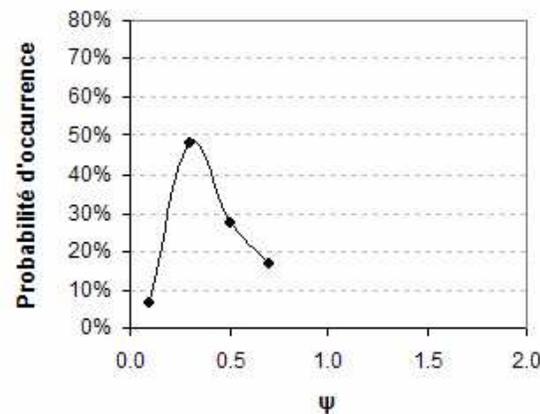


A_{total} [m ²]:	54889
$\bar{\Psi}$:	0.40
σ :	0.13
$\Psi_{10\%}$:	0.26
$A_{\Psi_{10\%}}$ [m ²]:	3356
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{total}$:	6.11
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}$:	0.65
$\Psi_{90\%}$:	0.62
$A_{\Psi_{90\%}}$ [m ²]:	1905
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{total}$:	3.47
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}$:	1.55

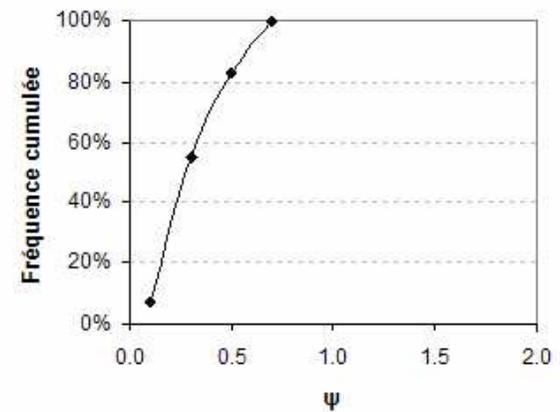
C 4 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



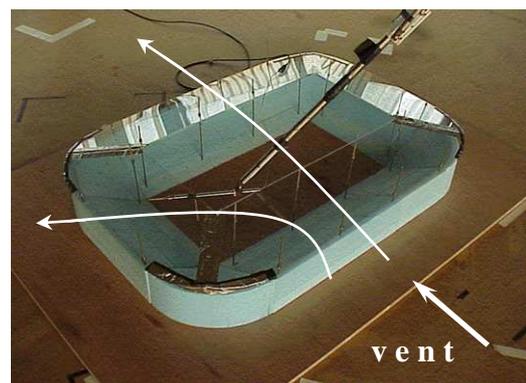
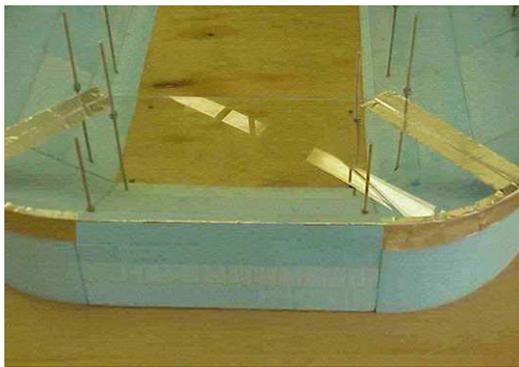
C 4 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 4 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C4 BIS – BRECHE FERMEE AUX ANGLES						
COMPARER A :	CAS DE REFERENCE, C4						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.52	0.25	0.86	0.48	1.65	4.04	2.48
Longitudinale	0.45	0.28	0.60	0.62	1.33	5.74	5.89
Transversale	0.37	0.20	0.54	0.54	1.46	9.41	1.13

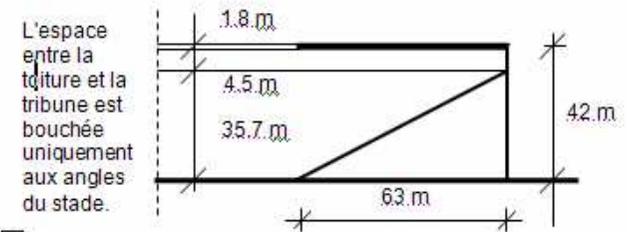
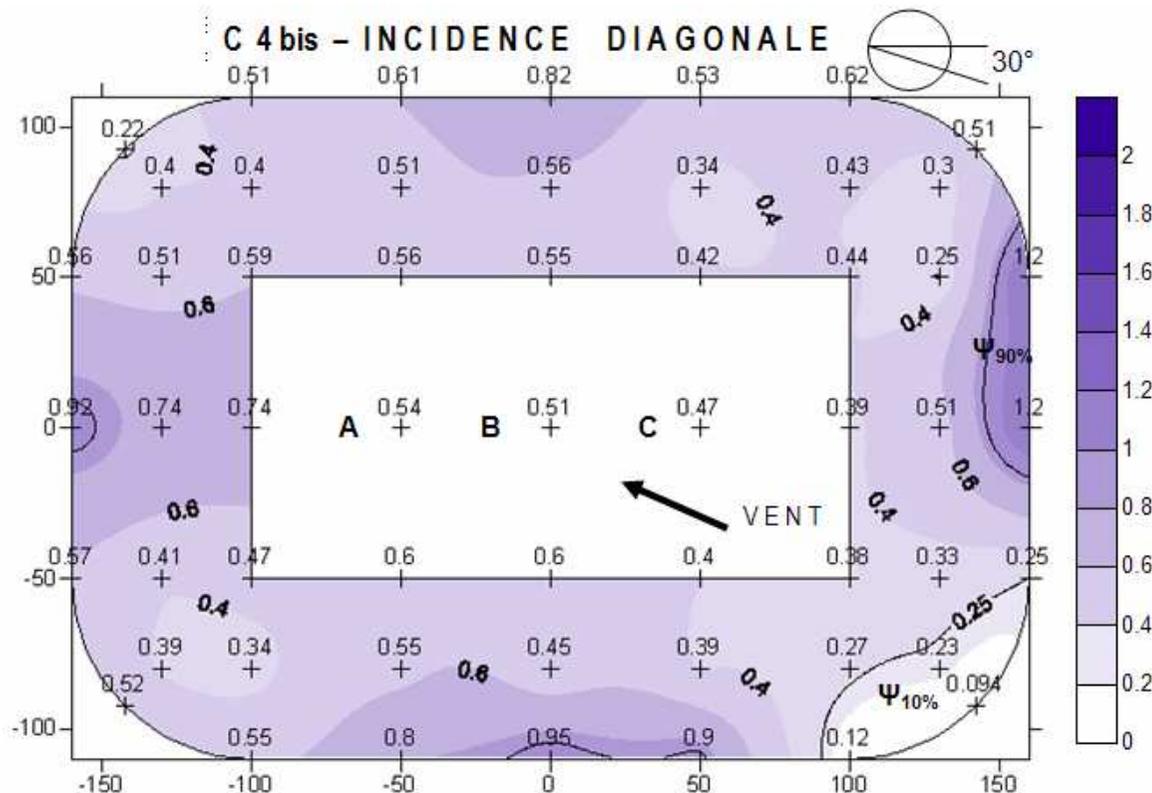


Description : La brèche horizontale qui sépare les gradins de la toiture est fermée dans les angles du stade et elle reste ouverte en long de la périphérie. La hauteur de cette brèche est identique à celle des configurations précédentes : 4.5 mètres. La toiture est horizontale et couvre l'intégralité des gradins.

Résultats : Le niveau de protection contre le vent est amélioré par rapport au cas de référence. Les écart-type des populations de valeurs de Ψ diminuent pour les incidences longitudinale et transversale. Cela signifie une homogénéité de l'écoulement plus importante par rapport à la première configuration. Cependant, la configuration précédente implique un écoulement plus homogène que la configuration présente.

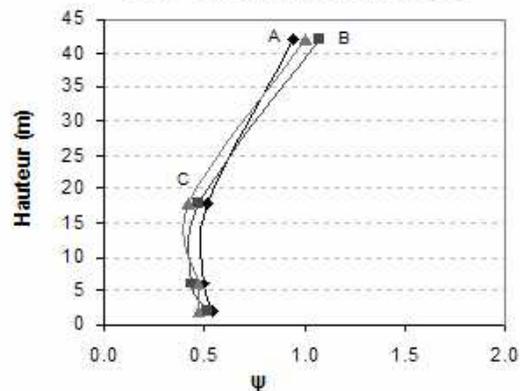
Les zones fortement ventilées qui se trouvent aux virages dans le cas de référence ont disparues grâce aux parois insérées dans la brèche entre la tribune et la toiture.

Cependant, le vent d'incidence diagonale induit des champs de vitesses hétérogènes au niveau des parties hautes des gradins au vent : derrière le paroi qui bouche la brèche entre la toiture une zone très protégée se forme. En revanche, au niveau de la partie haute de la tribune latérale qui ne comporte pas de paroi protectrice, une zone d'accélération apparaît avec des valeurs de Ψ importantes (1.2).

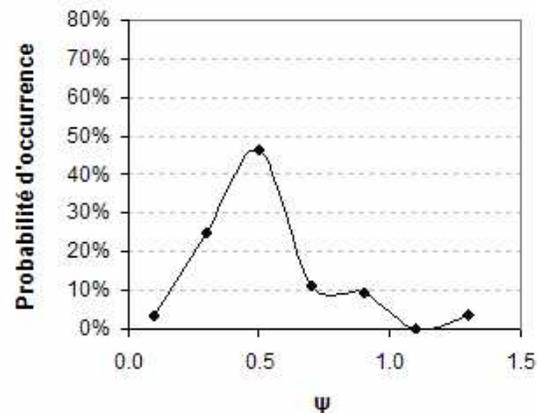


A_{totale} [m ²]:	54889
$\bar{\Psi}$:	0.52
σ :	0.23
$\Psi_{10\%}$:	0.25
$A_{\Psi_{10\%}}$ [m ²]:	2219
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}$:	4.04
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}$:	0.48
$\Psi_{90\%}$:	0.86
$A_{\Psi_{90\%}}$ [m ²]:	1363
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}$:	2.48
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}$:	1.65

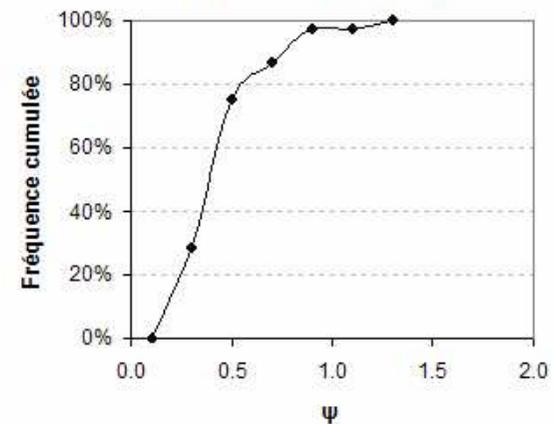
C 4bis - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



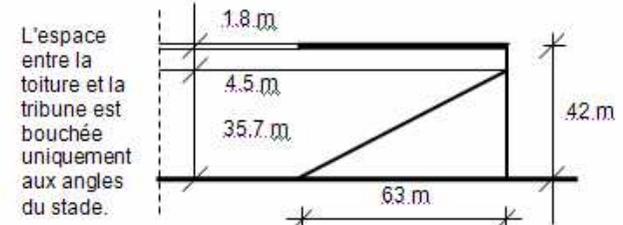
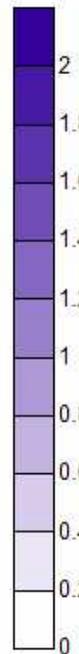
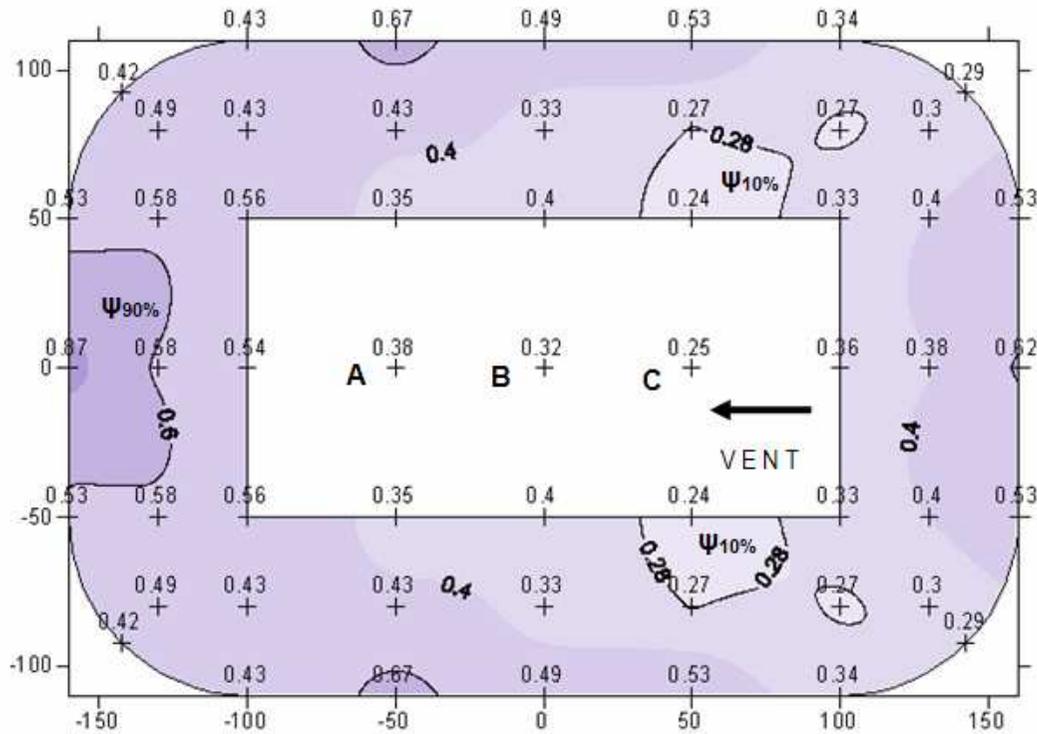
C 4bis - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 4bis - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

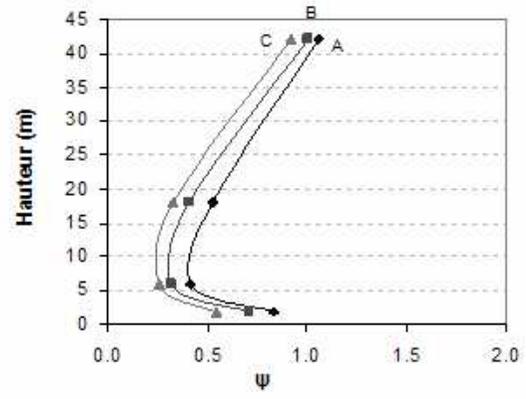


C 4bis - INCIDENCE LONGITUDINALE

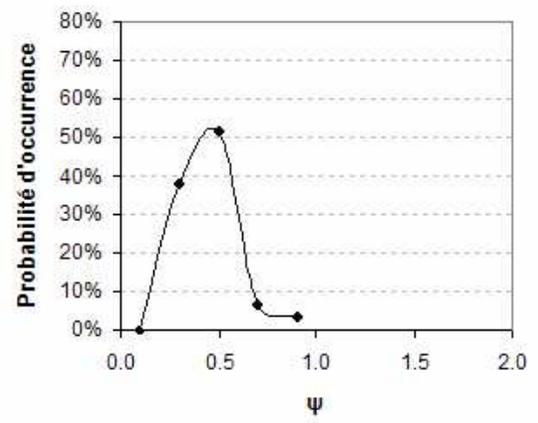


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.45
$\sigma:$	0.14
$\Psi_{10\%}:$	0.28
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3153
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	5.74
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.62
$\Psi_{90\%}:$	0.60
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	3232
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	5.89
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.33

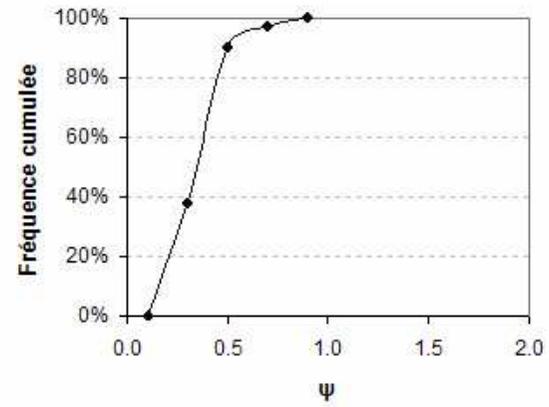
C 4bis - incidence longitudinale;
Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



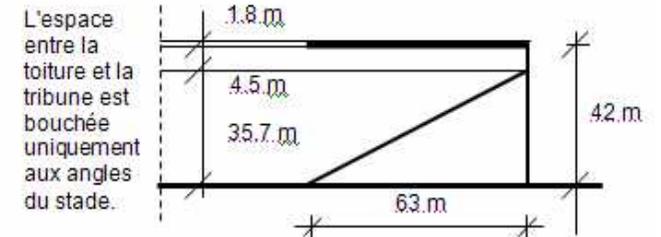
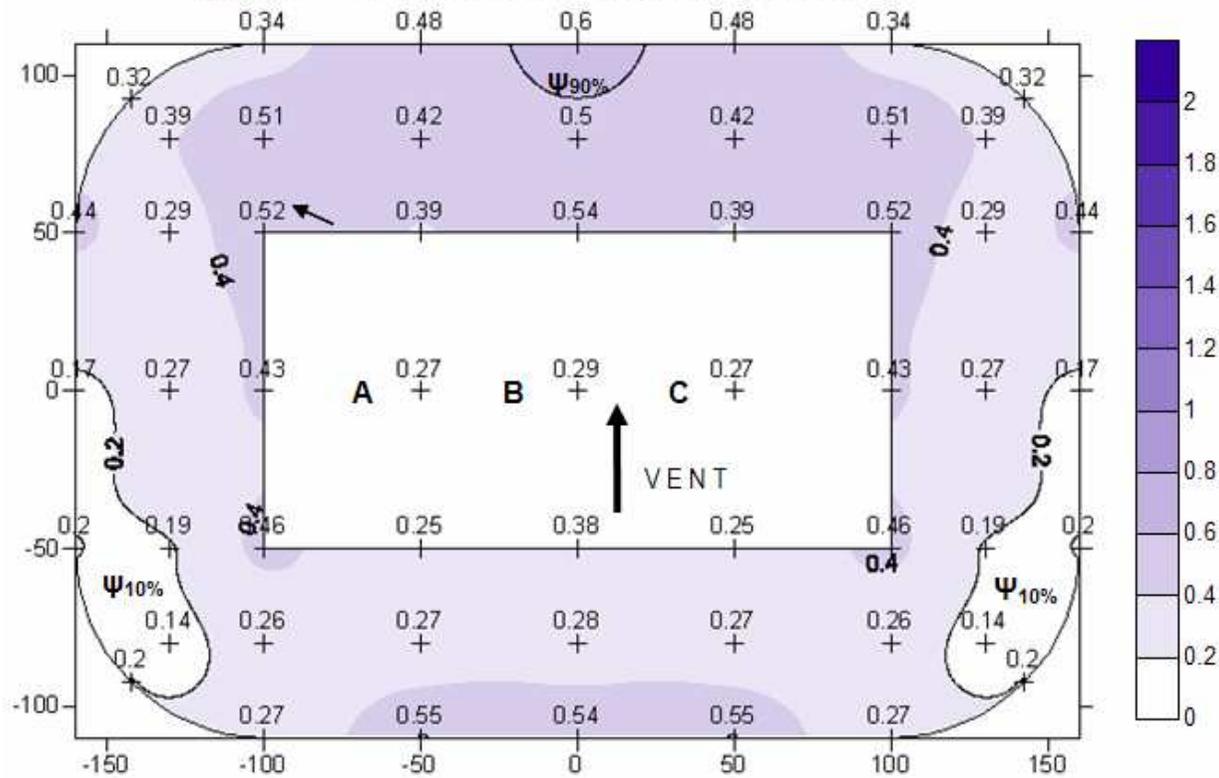
C 4bis - incidence longitudinale;
Densité de probabilité de ψ



C 4bis - incidence longitudinale;
Fréquence cumulée de ψ

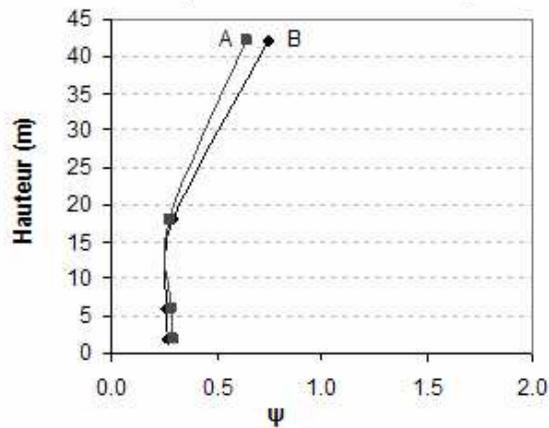


C 4 bis - INCIDENCE TRANSVERSALE

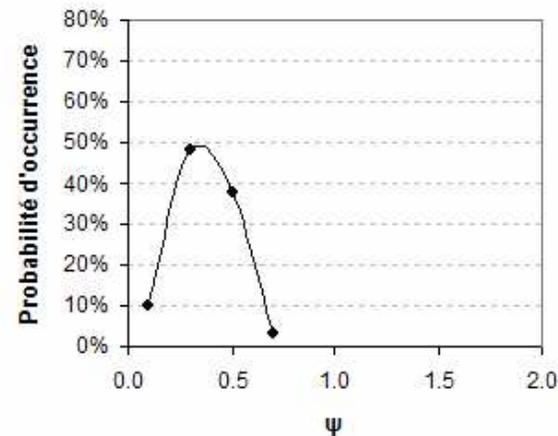


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.37
$\sigma:$	0.13
$\Psi_{10\%}:$	0.20
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	5163
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	9.41
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.54
$\Psi_{90\%}:$	0.54
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	620
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	1.13
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.65

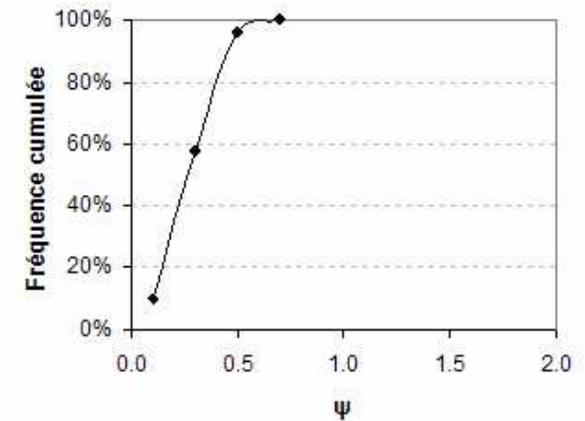
C 4bis - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



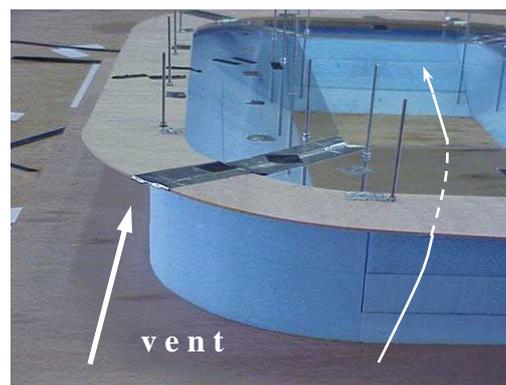
C 4bis - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 4bis - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C5 – TOITURE DEBORDANT VERS L'EXTERIEUR						
COMPARER A :	C1, C6						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.77	0.41	1.30	0.53	1.69	8.95	0.46
Longitudinale	0.73	0.41	1.15	0.56	1.58	5.17	1.20
Transversale	0.66	0.33	1.20	0.50	1.82	8.66	1.57

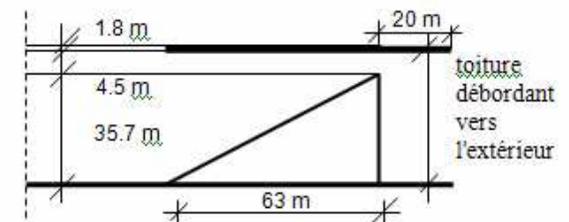
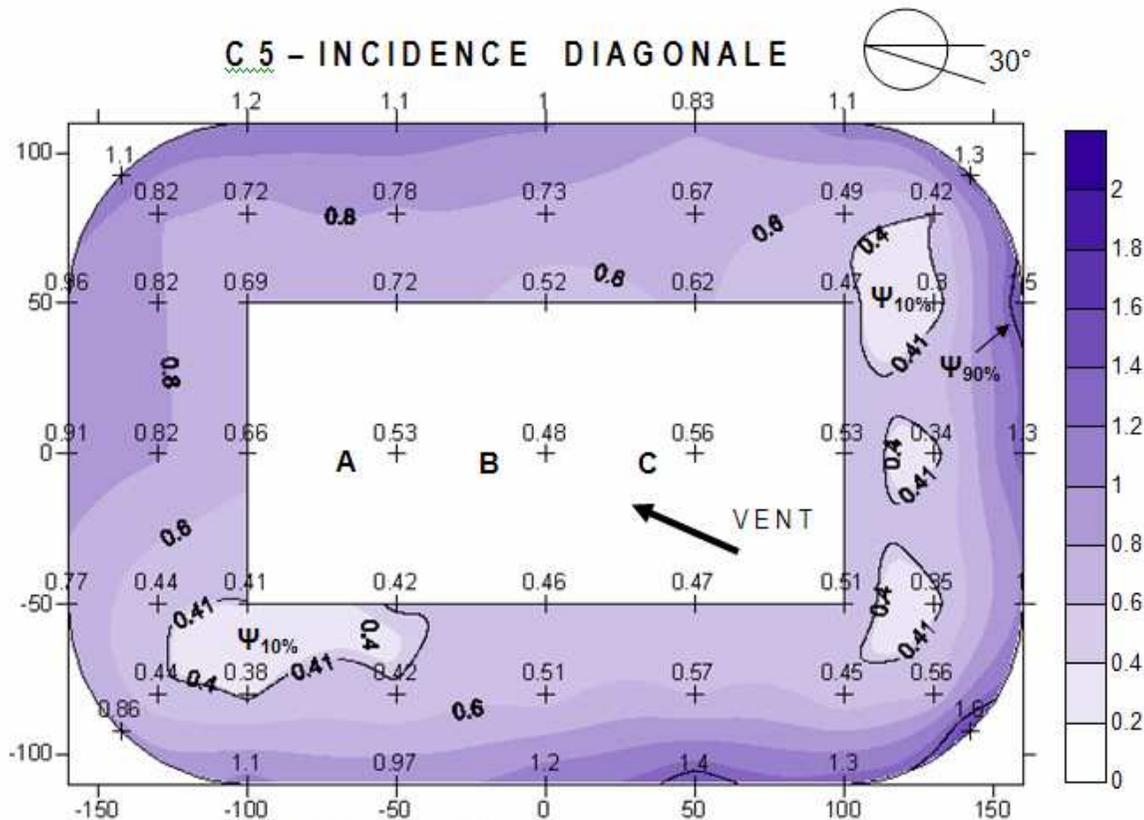


Description : Cette configuration possède une toiture qui a un débord de 20 mètres vers l'extérieur. Elle couvre l'intégralité des gradins et en est séparée par une brèche horizontale de hauteur 4.5 mètres.

Résultats : **Le débord de toiture fonctionne comme un déflecteur : il guide le flux pariétal ascendant et le conduit à travers la brèche horizontale entre la toiture et la tribune.** En conséquence des zones fortement ventilées apparaissent en particulier au niveau des parties hautes des tribunes au vent. Les zones de calme se trouvent principalement aux niveaux des parties basses des tribunes au vent.

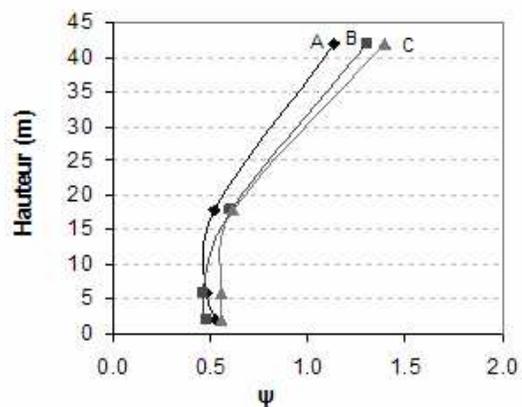
Les valeurs de $\bar{\Psi}$, de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ sont plus élevées que celles de la première configuration. L'écoulement est approximativement aussi homogène que la première configuration concernant les valeurs de $\Psi_{10\%}$, et plus homogène concernant les valeurs de $\Psi_{90\%}$. De plus les écart-types correspondant à toutes les incidences sont importants : 0.31, 0.33 et 0.34 et l'étendue des populations de données est également importante.

Le débord de toiture est un élément architectural accentué qui peut être avantageux en ce qui concerne l'ombrage de la façade en période estivale. L'écoulement qui rencontre la façade à l'ombre de la toiture, avant qu'il ne rentre à "l'intérieur" du stade sera rafraîchi et peut contribuer à l'amélioration du confort thermique des spectateurs.

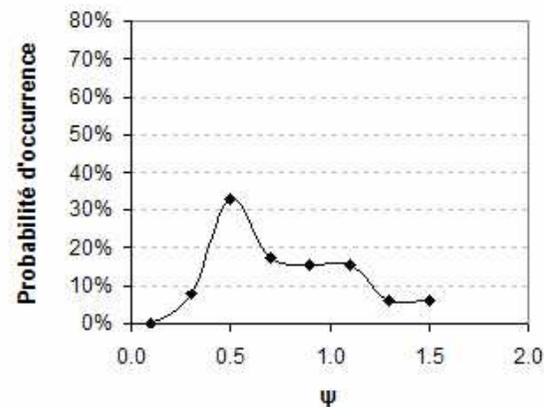


A_{totale} [m ²]:	54889
$\bar{\Psi}$:	0.77
σ :	0.34
$\Psi_{10\%}$:	0.41
$A_{\Psi_{10\%}}$ [m ²]:	4914
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}$:	8.95
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}$:	0.53
$\Psi_{90\%}$:	1.30
$A_{\Psi_{90\%}}$ [m ²]:	252
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}$:	0.46
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}$:	1.69

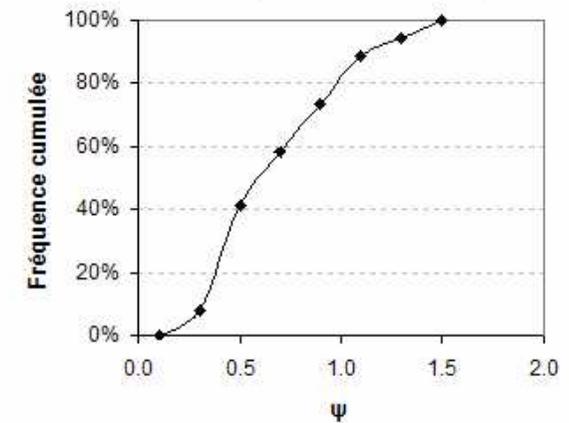
C 5 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



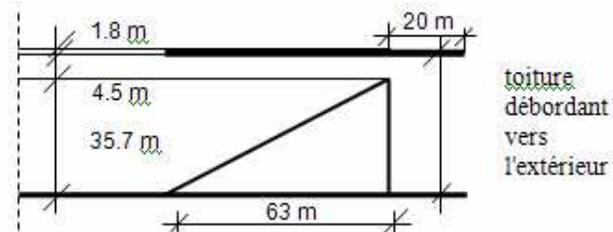
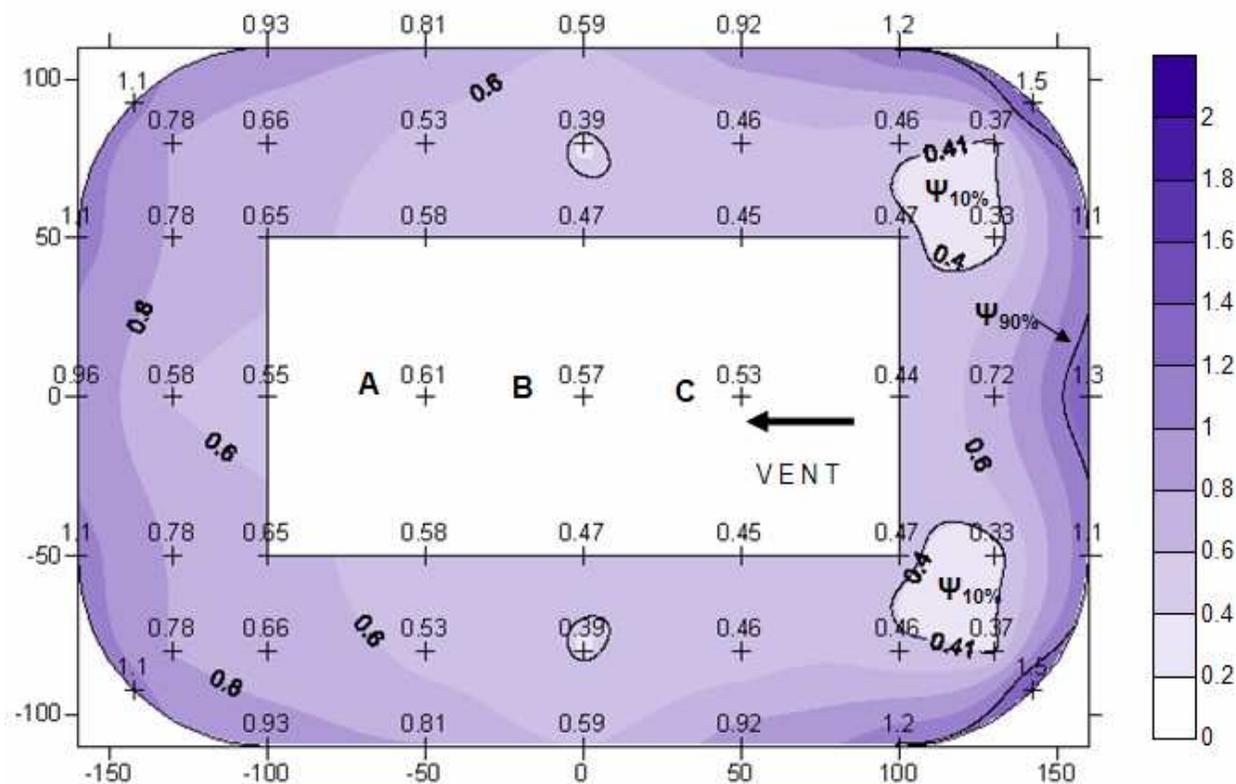
C 5 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 5 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

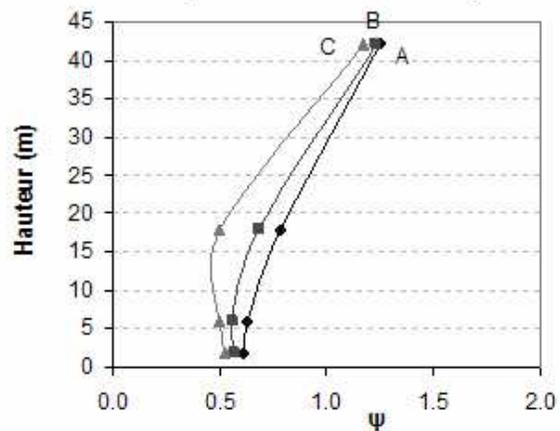


C 5 - INCIDENCE LONGITUDINALE

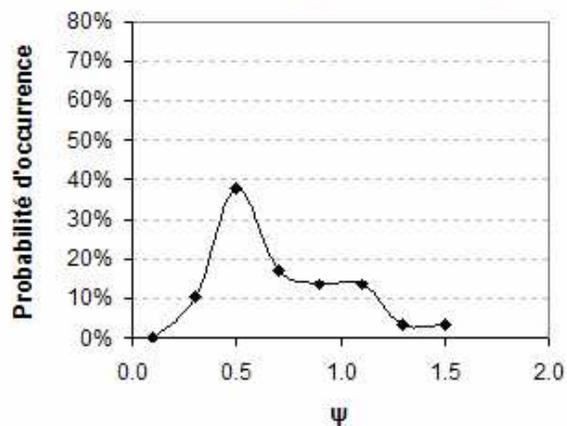


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.73
$\sigma:$	0.31
$\Psi_{10\%}:$	0.41
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	2835
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	5.17
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.56
$\Psi_{90\%}:$	1.15
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	660
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	1.20
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.58

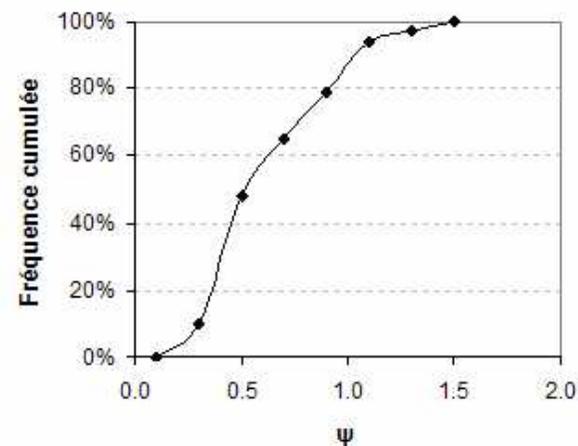
C 5 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



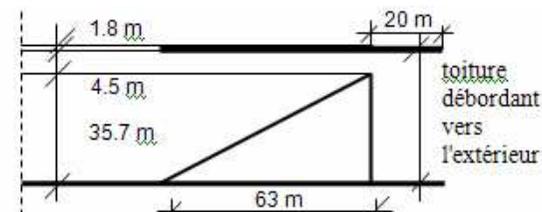
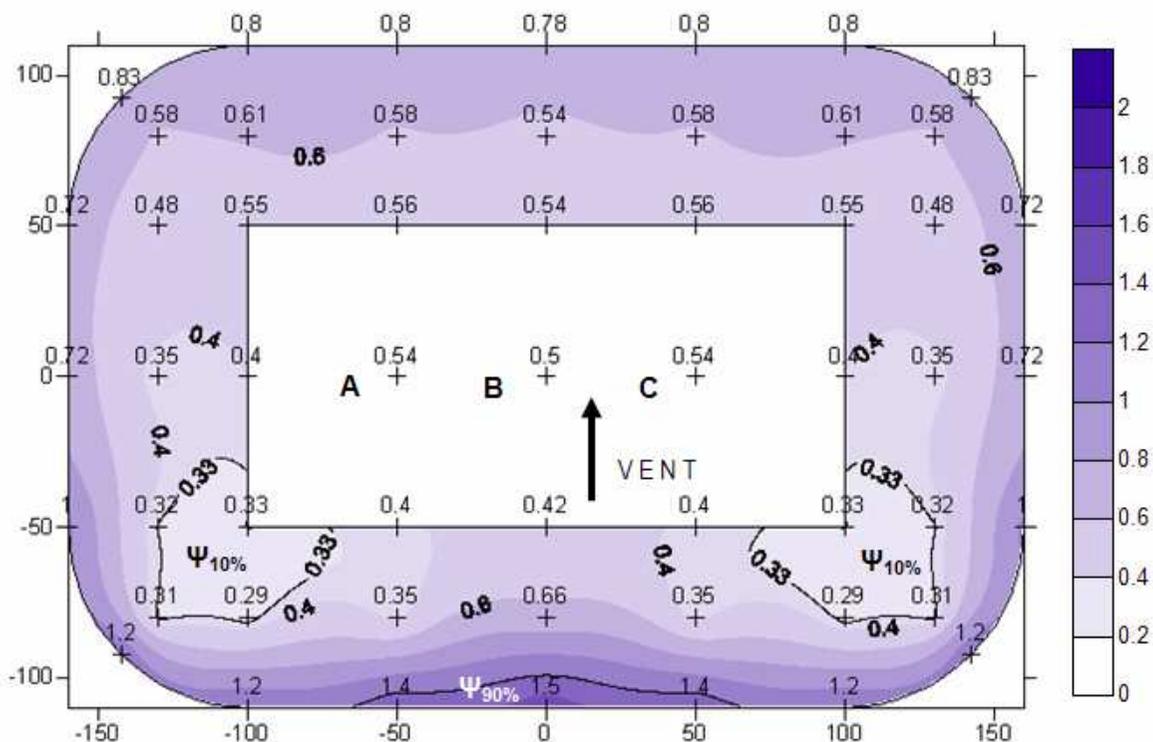
C 5 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 5 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

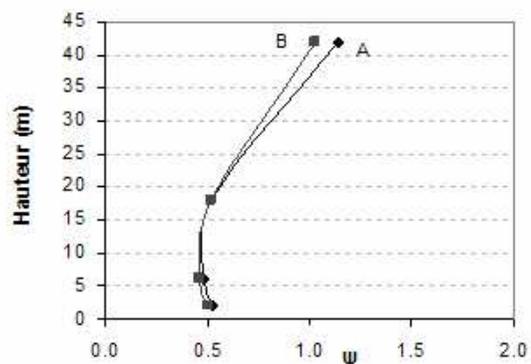


C 5 - INCIDENCE TRANSVERSALE

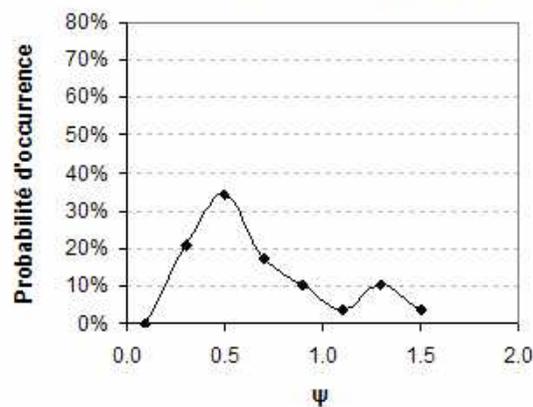


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.66
$\sigma:$	0.33
$\Psi_{10\%}:$	0.33
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	4756
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	8.66
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.50
$\Psi_{90\%}:$	1.2
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	859
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	1.57
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.82

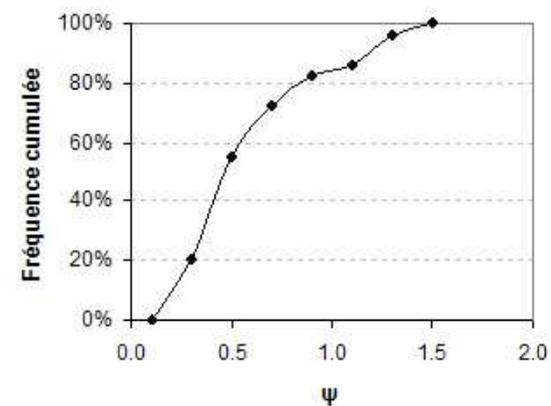
C 5 - incidence transverse; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



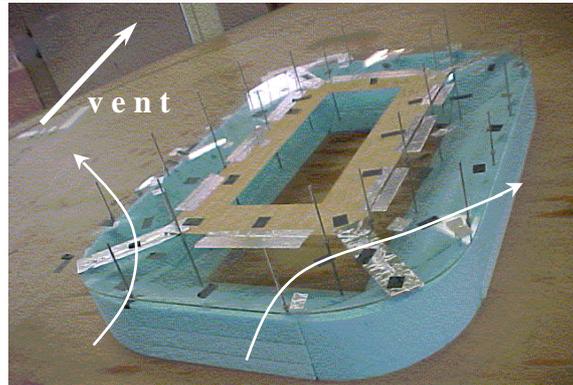
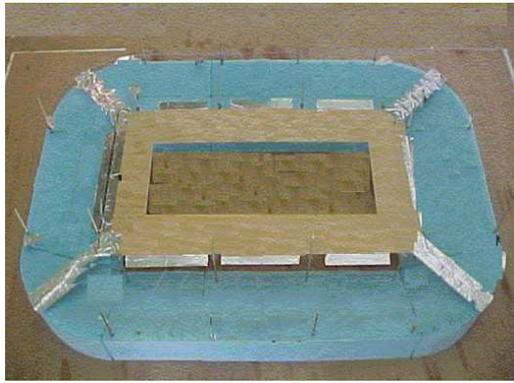
C 5 - incidence transverse; Densité de probabilité de ψ



C 5 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C6 – TOITURE D'OUVERTURE CENTRALE REDUITE						
COMPARER A :	C1, C5						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.59	0.30	1.05	0.51	1.78	7.20	0.93
Longitudinale	0.56	0.26	0.91	0.46	1.63	10.07	2.24
Transversale	0.47	0.25	0.87	0.53	1.85	10.51	0.78



Description : La toiture de cette configuration possède une ouverture centrale réduite. Elle couvre non seulement l'intégralité des gradins, mais encore la périphérie de l'aire de jeu. Elle est séparée des gradins par une brèche horizontale de hauteur 4.5 mètres. L'ouverture centrale réduite peut être interprétée comme un débord de 20 mètres vers l'aire de jeu.

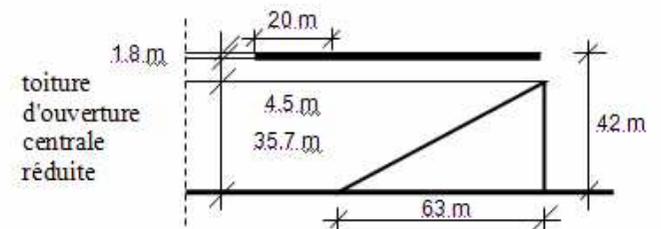
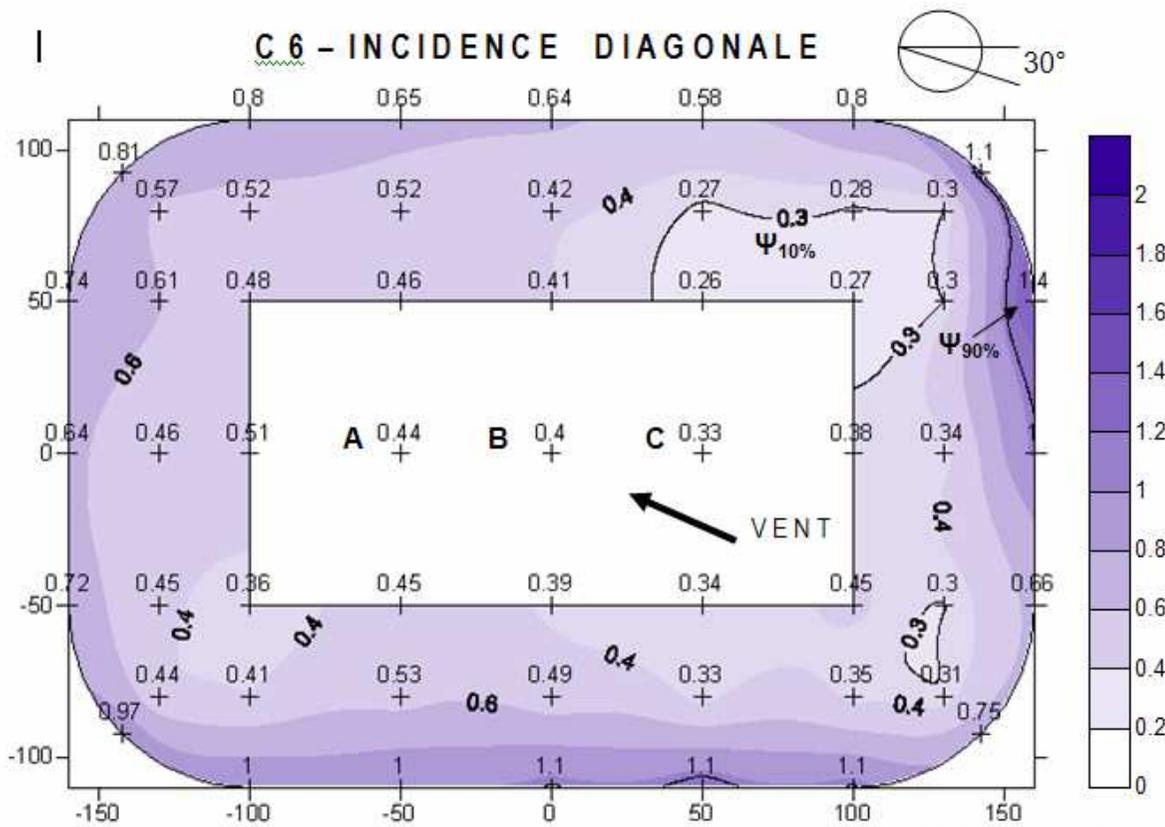
Résultats : Cette configuration est légèrement plus ventilée que la première configuration. Cela est indiqué par les valeurs de $\bar{\Psi}$ et également celles de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$, qui sont plus élevées que celles de la première configuration. En plus, l'écoulement est plus hétérogène dans la configuration présente. Cela est indiqué par l'étendue importante de population de valeurs de Ψ pour les trois incidences.

Ces résultats mettent en évidence qu'une toiture d'oculus (ouverture centrale) réduit ne conduit pas forcément à l'atténuation de l'écoulement et ne rend pas forcément l'écoulement homogène.

Les zones d'accélération apparaissent en particulier au niveau des parties hautes des tribunes au vent. Les zones de calme se trouvent aux niveaux des parties basses des tribunes au vent.

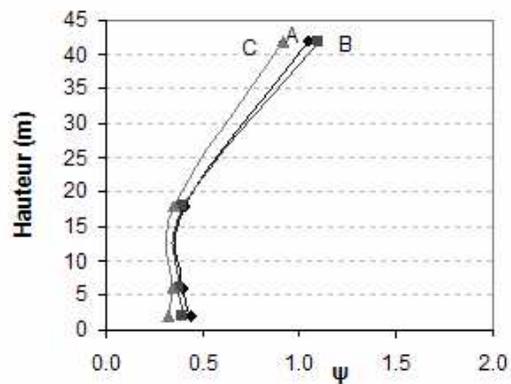
La réduction de l'ouverture centrale augmente significativement les zones d'ombre sur l'aire de jeu et les tribunes, en conséquence cette configuration semble une bonne solution pour les climats chauds, ou pour les périodes estivales en climats tempérés. Cependant, le critère de confort visuel, notamment l'uniformité de l'éclairage de l'aire de jeu est difficile à satisfaire par cette configuration. L'ombre accentuée de la toiture projetée sur l'aire de jeu engendre un contraste forte avec la partie ensoleillée. Ce contraste affecte les conditions du confort visuel des spectateurs.

L'ouverture réduite de la toiture freine probablement l'écoulement dû à l'effet de convection naturelle. Le stade est plus couvert par la toiture que dans la première configuration. Cela peut favoriser certain aspect l'ambiance acoustique, en particulier en augmentant le temps de réverbération. Néanmoins, ce dernier dépend principalement du traitement des surfaces.

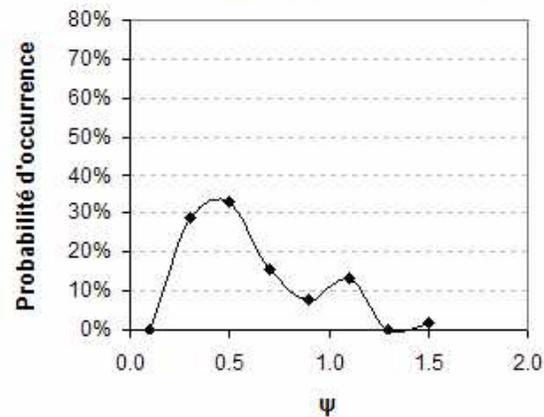


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.59
$\sigma:$	0.28
$\Psi_{10\%}:$	0.30
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3951
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	7.20
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.51
$\Psi_{90\%}:$	1.05
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	512
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	0.93
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.78

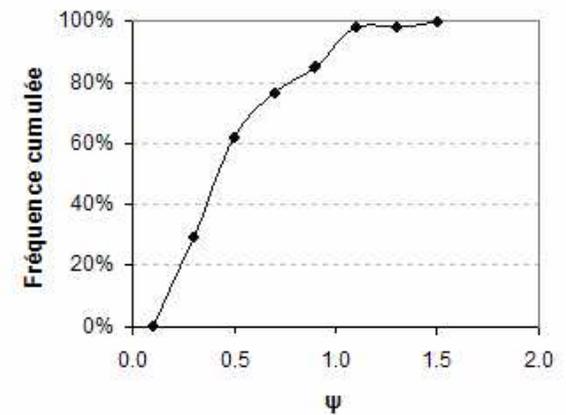
C 6 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



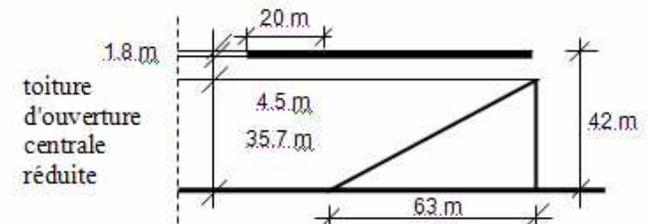
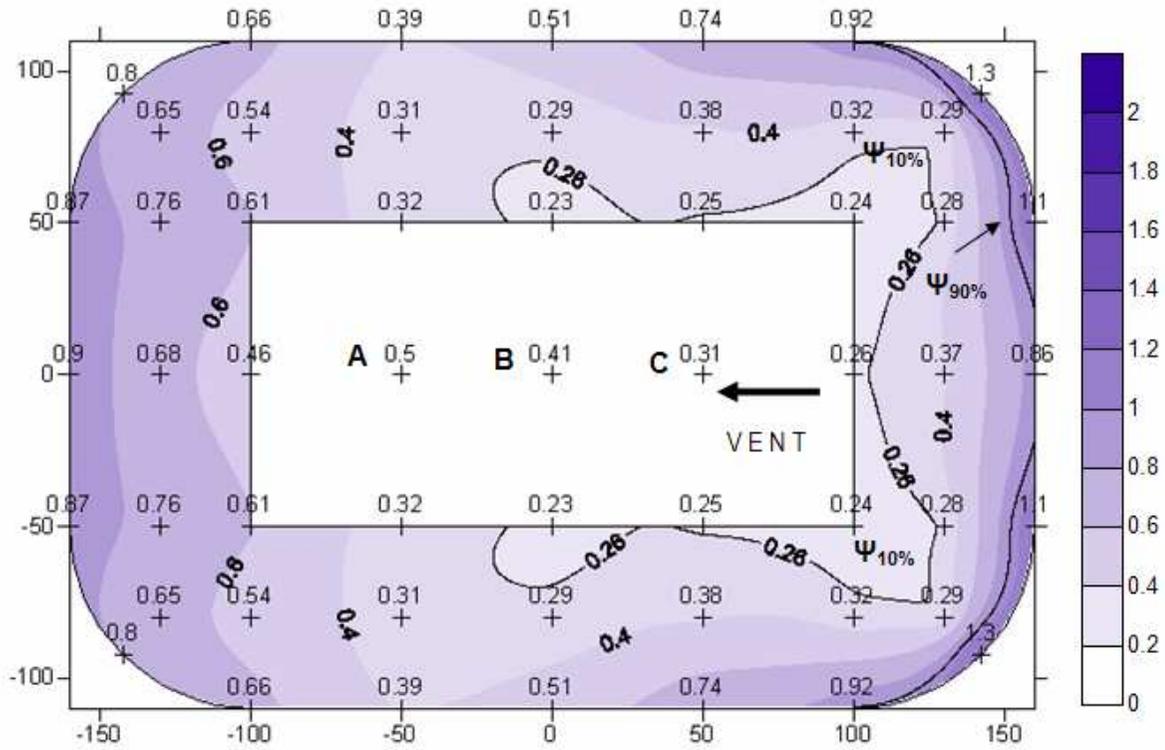
C 6 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 6 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

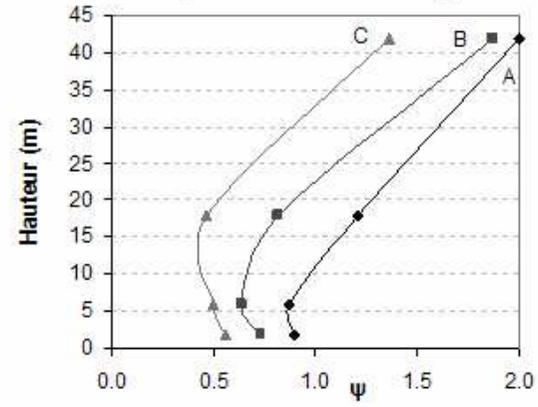


C 6 - INCIDENCE LONGITUDINALE

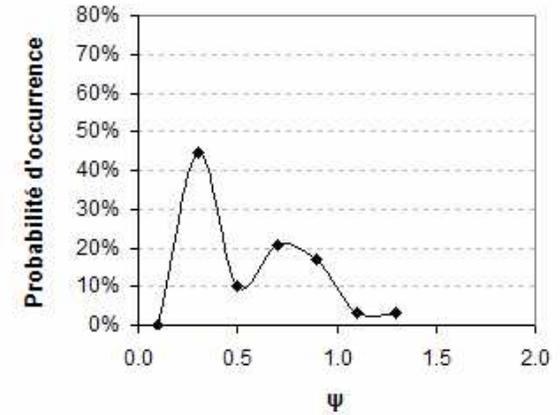


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi} :$	0.56
$\sigma :$	0.29
$\Psi_{10\%} :$	0.26
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	5528
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale} :$	10.07
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi} :$	0.46
$\Psi_{90\%} :$	0.91
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1228
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale} :$	2.24
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi} :$	1.63

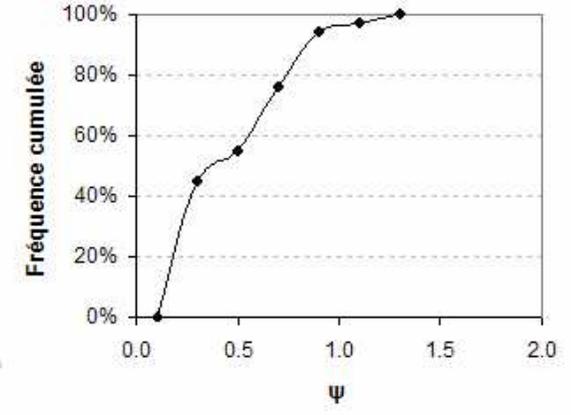
C 6 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



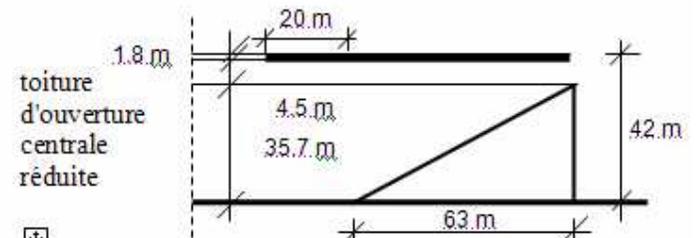
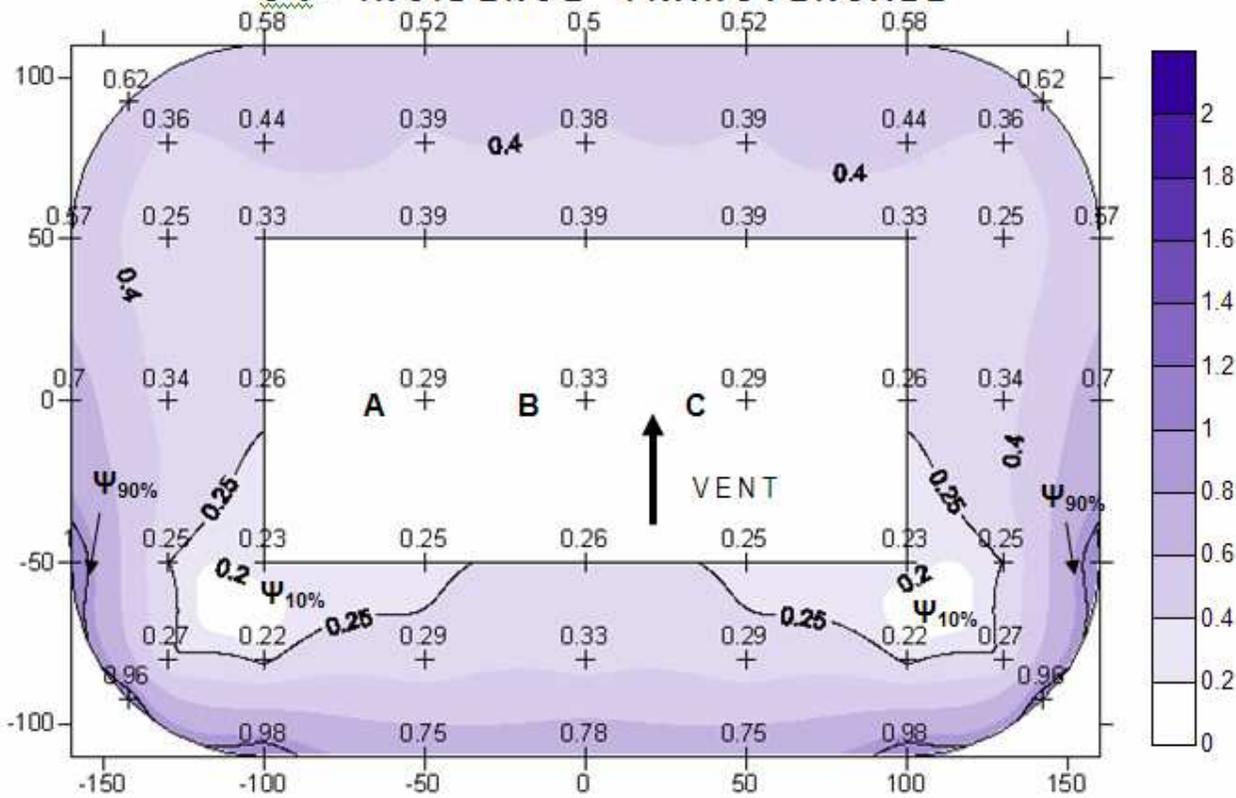
C 6 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 6 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

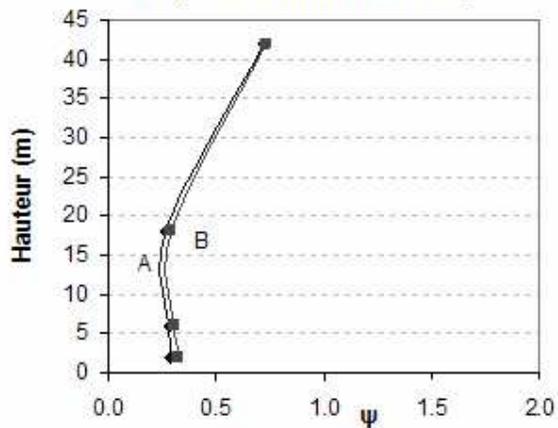


C 6 - INCIDENCE TRANSVERSALE

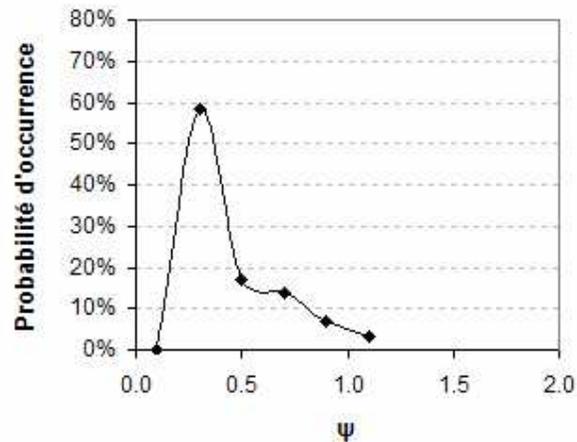


$A_{\text{totale}} [\text{m}^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.47
$\sigma:$	0.24
$\Psi_{10\%}:$	0.25
$A_{\Psi_{10\%}} [\text{m}^2]:$	5771
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{\text{totale}}:$	10.51
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.53
$100 \cdot \Psi_{10\%} \cdot A_{\Psi_{10\%}} / (\bar{\Psi} \cdot A_{\text{totale}}):$	5.59
$A_{\Psi_{90\%}} [\text{m}^2]:$	428
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{\text{totale}}:$	0.78
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.85

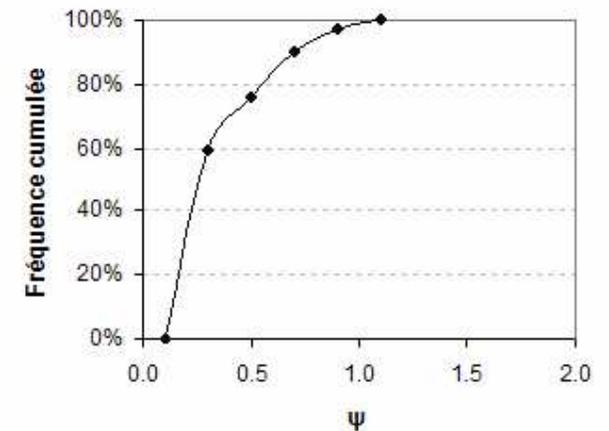
C 6 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



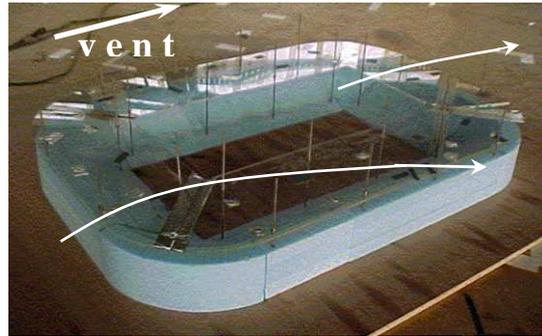
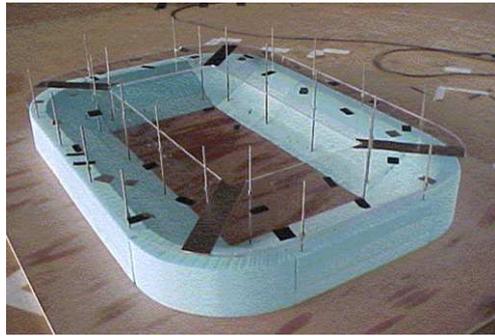
C 6 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 6 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C7 – BRECHE DE HAUTEUR AUGMENTEE ENTRE LA TOITURE ET LES GRADINS						
COMPARER A :	C1, C4, C17						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.74	0.38	1.23	0.51	1.66	8.19	0.34
Longitudinale	0.71	0.37	1.27	0.52	1.79	9.34	1.47
Transversale	0.63	0.29	1.07	0.46	1.70	7.97	0.07



Description : La toiture et les gradins de cette configuration sont séparés par une brèche de hauteur augmentée : elle mesure 9 mètres en vraie grandeur. La toiture couvre des l'intégralité des gradins.

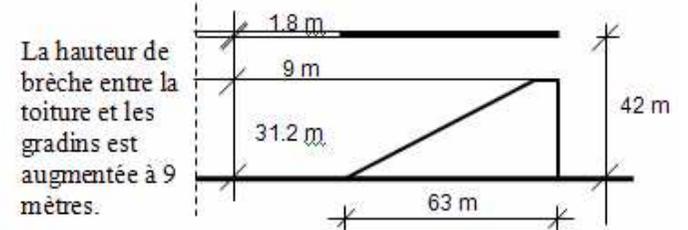
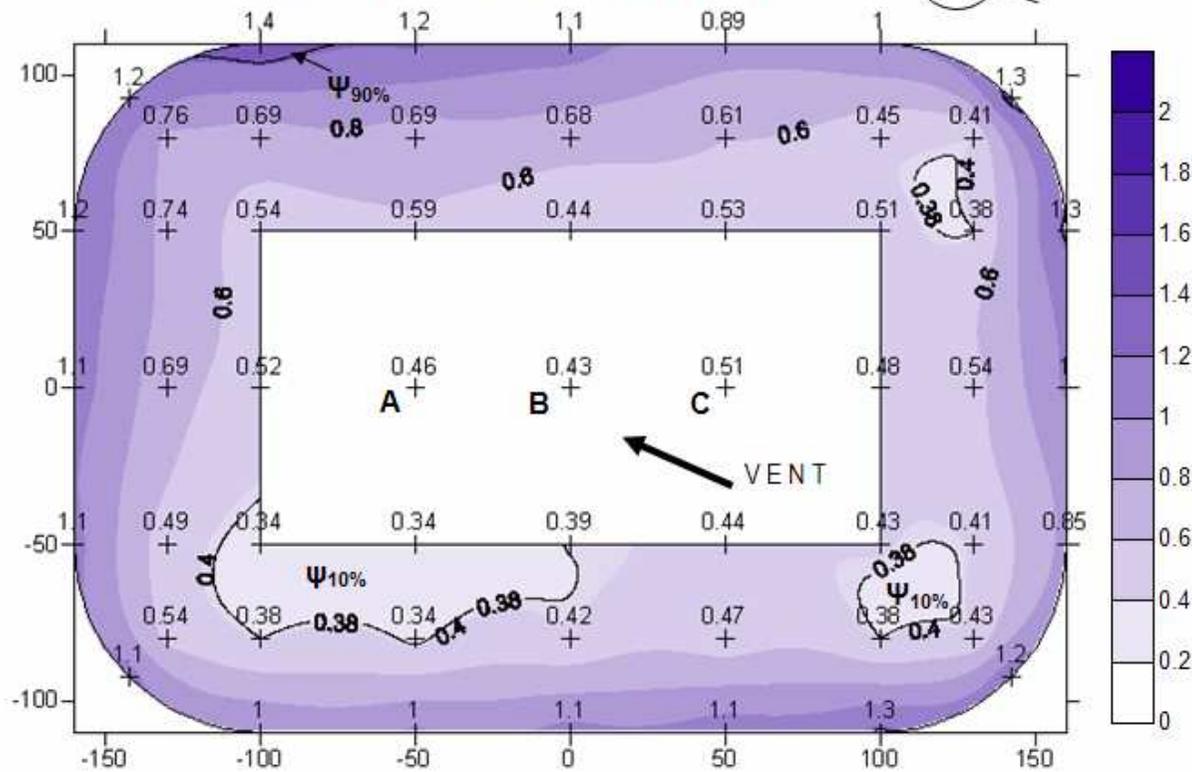
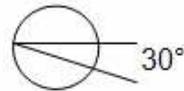
Résultats : Les tribunes de cette configuration sont globalement plus fortement ventilées que celles de la première configuration : les valeurs de $\bar{\Psi}$ sont augmentées d'environ 35%, par rapport à la première configuration. Les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ sont également plus élevées que celles de première configuration. De plus, l'écoulement est plus hétérogène que dans la première configuration. Cela est indiqué par l'étendue importante de la population de valeurs de Ψ pour les trois incidences.

Les zones d'accélération apparaissent aux niveaux des parties hautes des gradins sous le vent où l'écoulement sort de l'enceinte du stade. Les aires des zones d'accélération sont très réduites : elles représentent moins de 3% de l'aire totale des gradins pour les trois incidences confondues. Cependant, les zones de calme représentent une surface significative : elles équivalent environ à 8.5% de la surface totale pour chaque configuration. Elles se trouvent principalement au niveau des parties basses des gradins au vent.

Une brèche horizontale de hauteur plus importante entre la toiture et des gradins augmente l'aire des zones de calme et réduit celles des zones fortement ventilées. Ces dernières pourraient probablement être évitées par l'insertion d'écrans brise-vent dans les brèches.

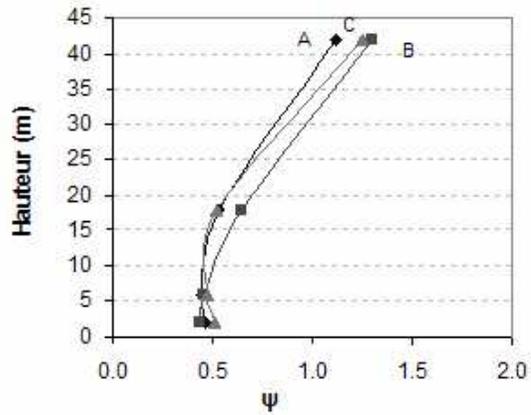
La toiture exposée au rayonnement direct se rechauffe. Une toiture plus éloignée des tribunes est visible par les spectateurs sous un angle solide moins important, en conséquence la quantité de rayonnement infrarouge qu'ils reçoivent est également moins importante. Cela est avantageux pendant les périodes chaudes, en particulier dans les parties hautes des gradins.

C7 - INCIDENCE DIAGONALE

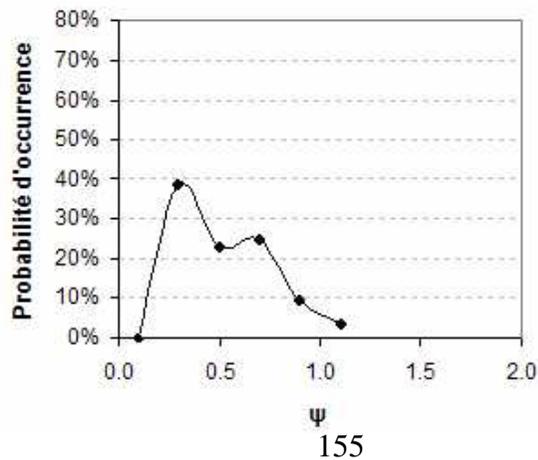


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.74
$\sigma:$	0.33
$\Psi_{10\%}:$	0.38
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	4494
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	8.19
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.51
$\Psi_{90\%}:$	1.23
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	189
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	0.34
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.66

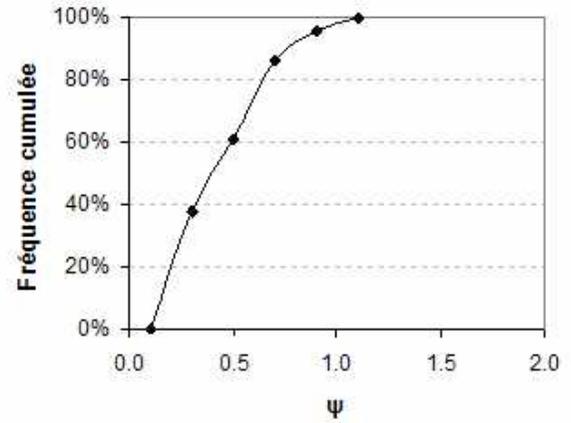
C7 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



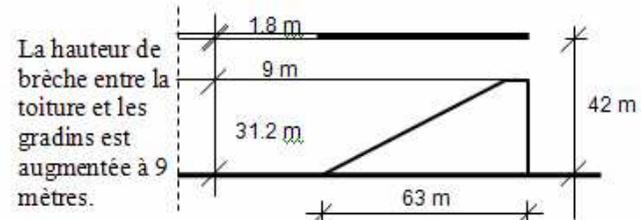
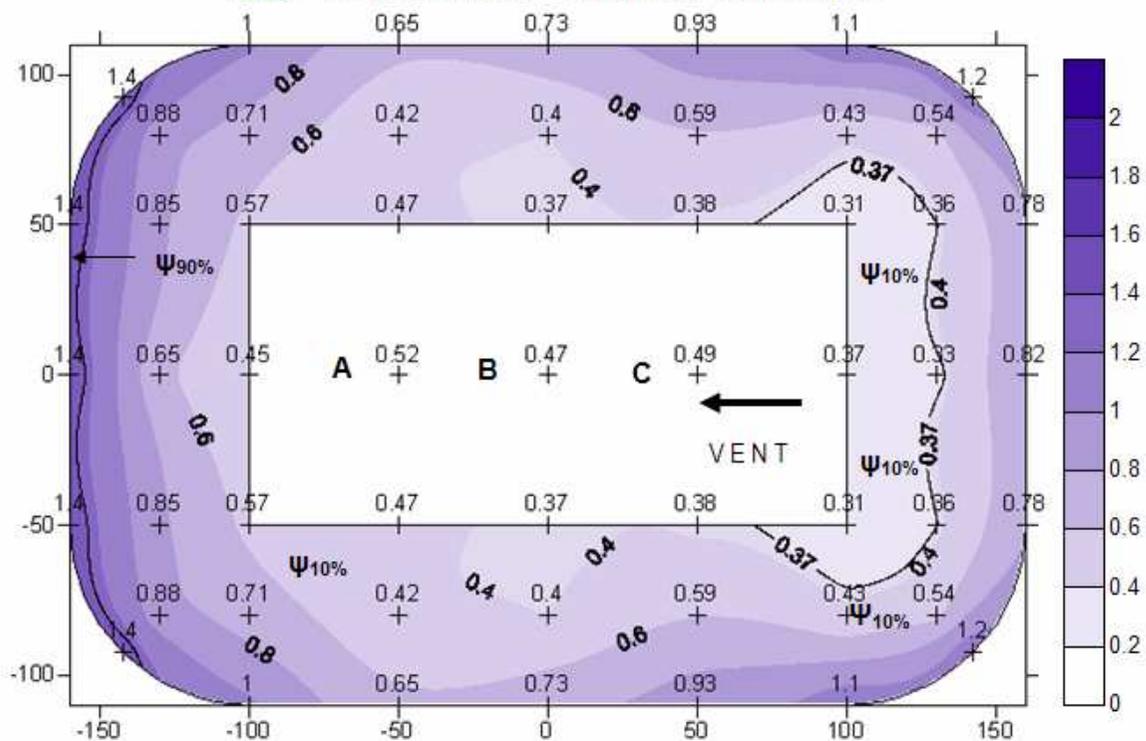
C7 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C7 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

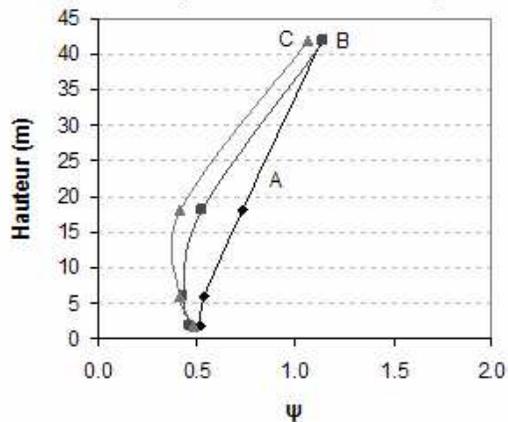


C7- INCIDENCE LONGITUDINALE

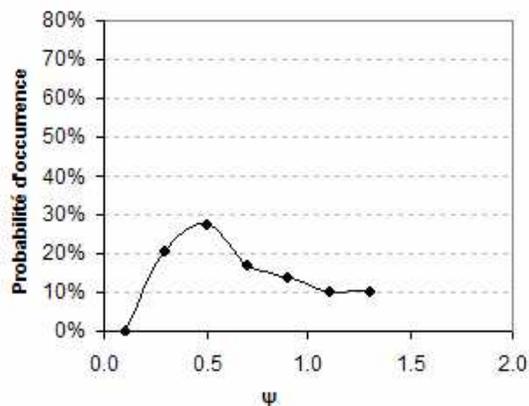


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.71
$\sigma:$	0.34
$\Psi_{10\%}:$	0.37
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	5126
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	9.34
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.52
$\Psi_{90\%}:$	1.27
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	805
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	1.47
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.79

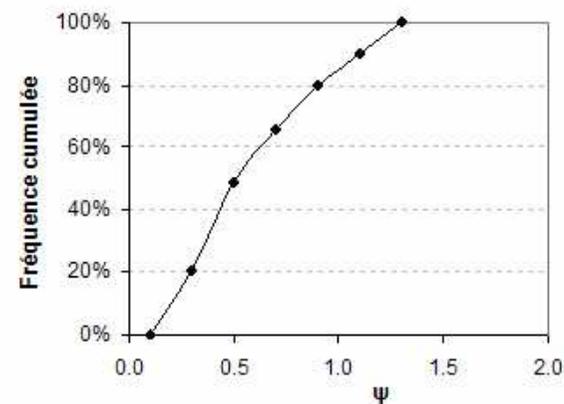
C7 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



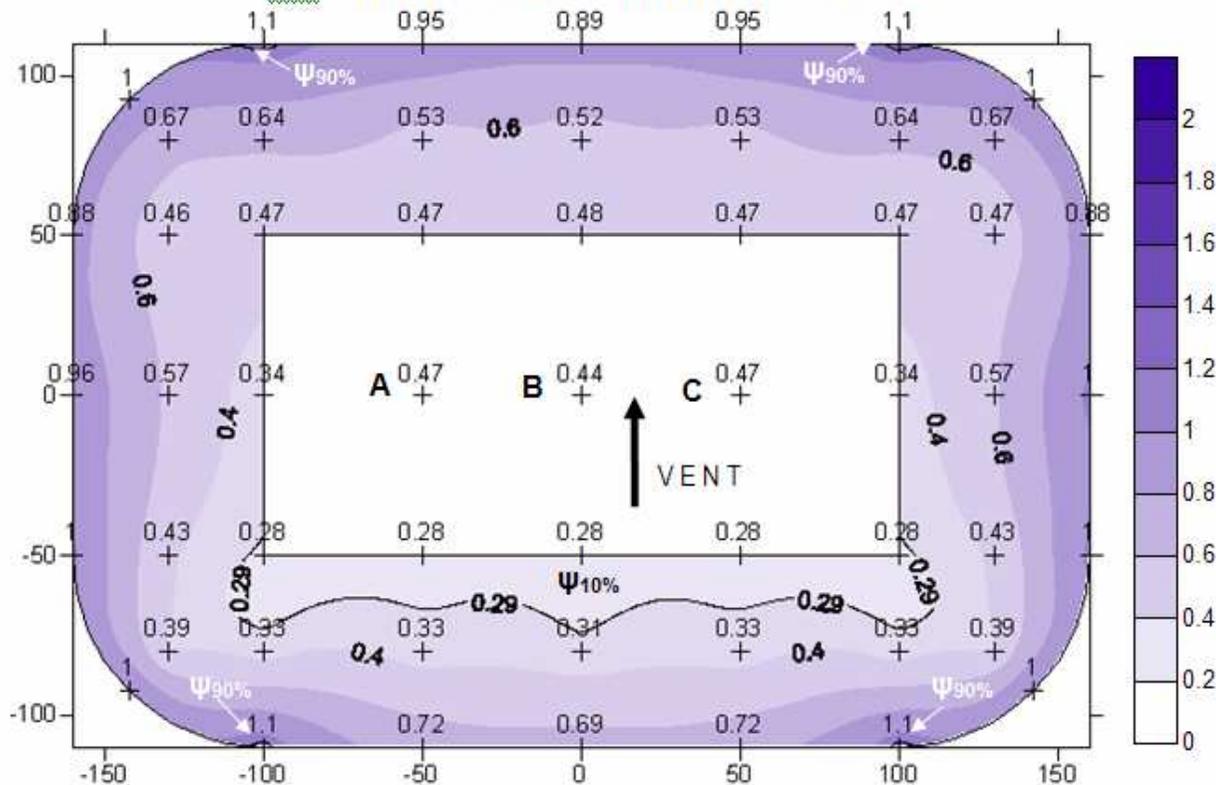
C7 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



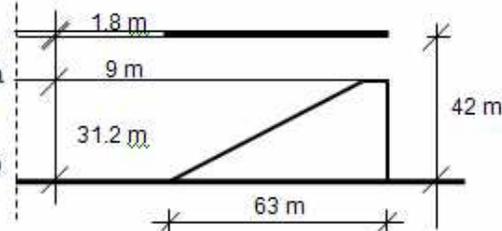
C7 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ



C7 - INCIDENCE TRANSVERSALE

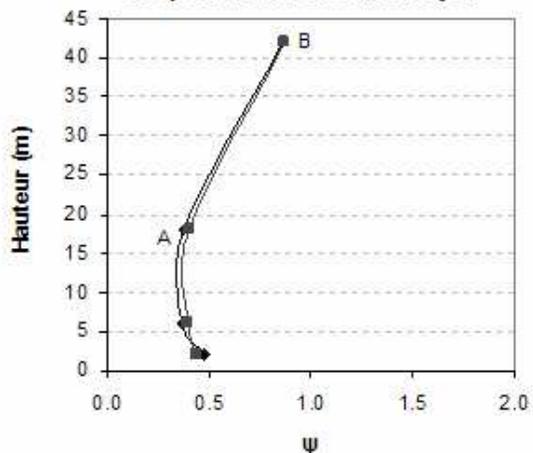


La hauteur de brèche entre la toiture et les gradins est augmentée à 9 mètres.

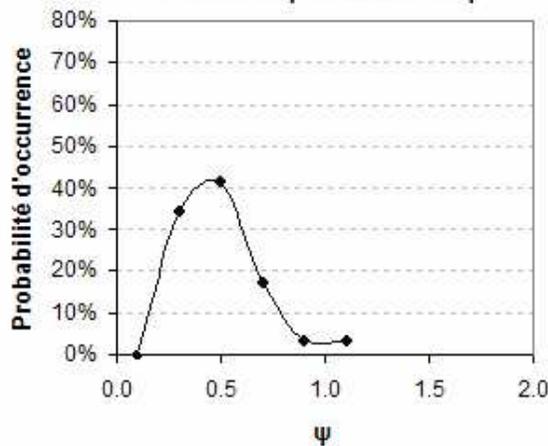


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.63
$\sigma:$	0.29
$\Psi_{10\%}:$	0.29
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	4374
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	7.97
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.46
$\Psi_{90\%}:$	1.07
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	37
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	0.07
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.70

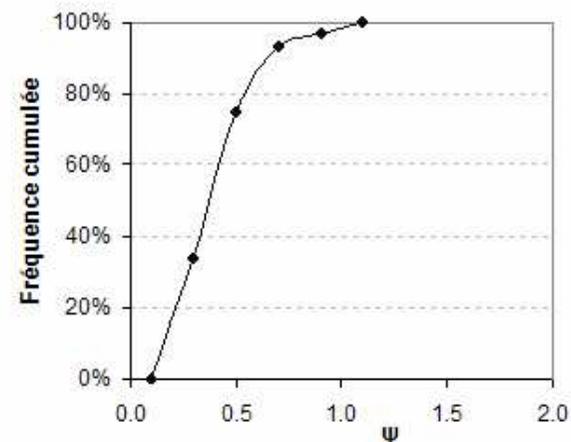
C 7 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



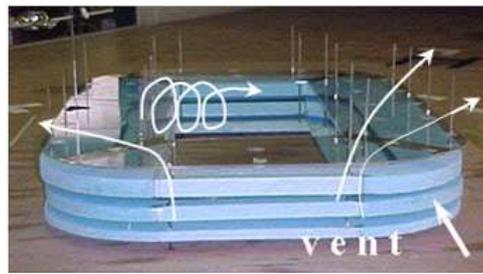
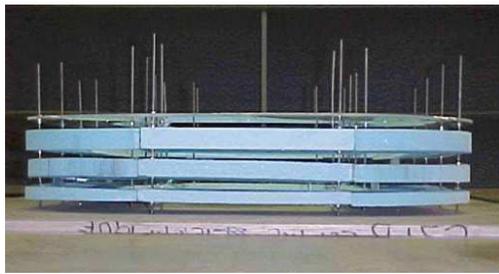
C 7 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 7 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C8 – FACADE DIVISEE PAR 4 BRECHES HORIZONTALES						
COMPARER A :	C1, C4, C9, C10, C17, C18, C19						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.98	0.60	1.39	0.61	1.42	5.75	7.10
Longitudinale	0.86	0.53	1.31	0.62	1.52	8.18	5.10
Transversale	0.94	0.55	1.30	0.59	1.38	11.51	6.7



Description : La façade de cette configuration est divisée par quatre brèches horizontales périphériques uniformément réparties. Elles séparent le niveau de l'aire de jeu de premier niveau des gradins, les différents niveaux des gradins et la toiture des gradins. Chacune des brèches mesure 4.5 mètres de hauteur. La porosité est le rapport entre l'aire des brèches et la surface totale de la façade. Dans la configuration présente elle équivaut environ à 40%.

La toiture couvre l'intégralité des gradins.

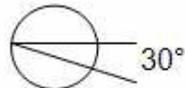
Résultats : Cette configuration est plus fortement ventilée au niveau des gradins que la première configuration : les valeurs de $\bar{\Psi}$ se situent près de 1, et sont augmentées d'environ 80%, par rapport à celles de la première configuration. **Cette configuration génère des conditions aérodynamiques à peu près identiques à celles rencontrées en amont du stade à 2 mètres de hauteur en zone dégagée.** Cela veut dire qu'elle ne protège pratiquement pas les spectateurs contre le vent.

Au niveau de l'aire de jeu des valeurs de Ψ très élevées ont été mesurées, surtout pour l'incidence transversale. L'irrigation intense de l'aire de jeu par l'air peut gêner l'homologation des résultats d'athlétisme ou la trajectoire du ballon. Cependant, un écoulement plus intense est plus favorable du point de vue de la ventilation de la pelouse.

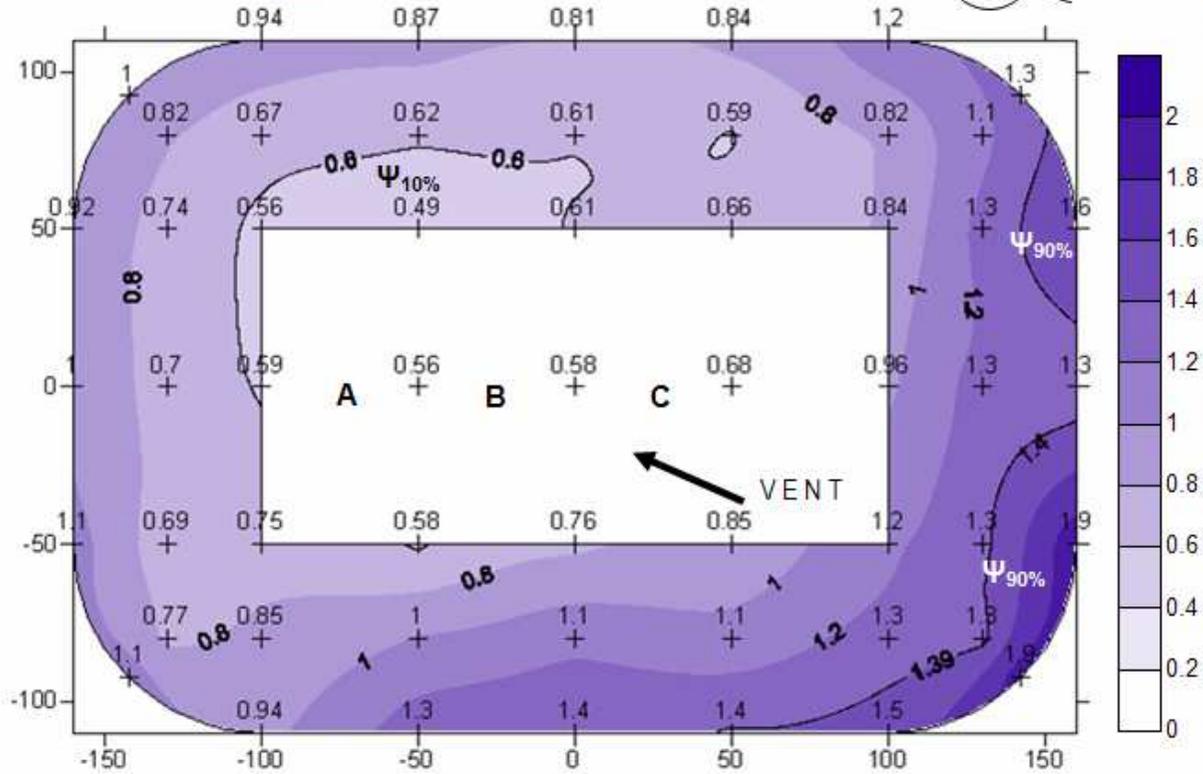
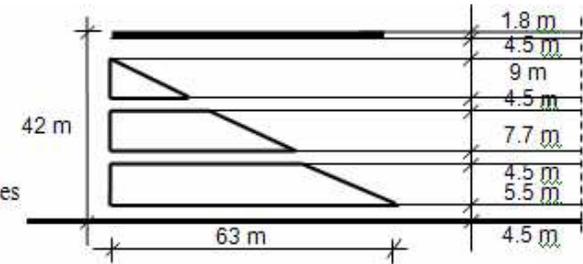
Les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ sont également plus élevées que celles de la première configuration. Les zones d'accélération se trouvent au niveau de parties hautes des gradins au vent et représentent une surface relativement élevée : 10% de la surface totale des gradins pour chaque configuration. **Dans la zone la plus fortement ventilée pour l'incidence longitudinale, se trouve la valeur de Ψ la plus importante mesurée parmi toutes les configurations : 1.9!** Les zones de calme se trouvent au niveau des parties basses des tribunes sous le vent. Les indices d'homogénéité (IH 10% et IH 90%) illustrent un écoulement plus homogène que celui de la première configuration. Cela est probablement dû à la répartition uniforme des brèches horizontales.

L'avantage de cette configuration est la ventilation globale relativement homogène, mais intense. En conséquence, elle pourrait être une solution idéale pour les climats chauds. Les brèches horizontales facilitent la structuration claire de la circulation horizontale des spectateurs et aussi la séparation des supporters de différentes équipes – ceci apporte un aspect de sécurité.

C 8 - INCIDENCE DIAGONALE

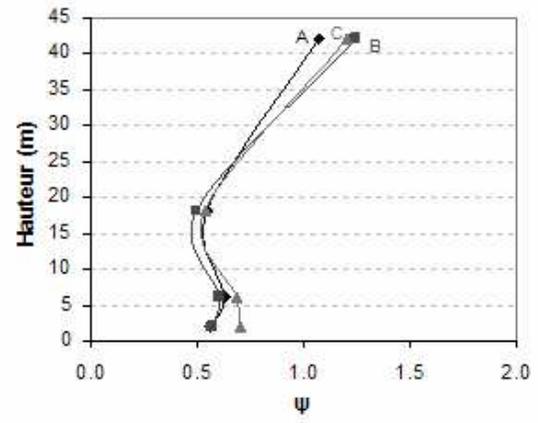


façade divisée par 4 brèches horizontales

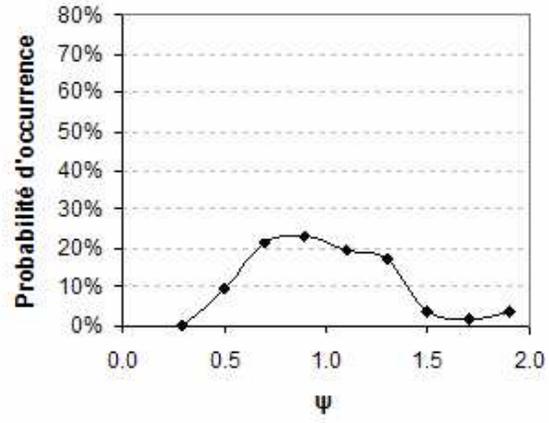


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.98
$\sigma:$	0.34
$\Psi_{10\%}:$	0.60
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3156
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	5.75
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.61
$\Psi_{90\%}:$	1.39
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	3898
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	7.10
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.42

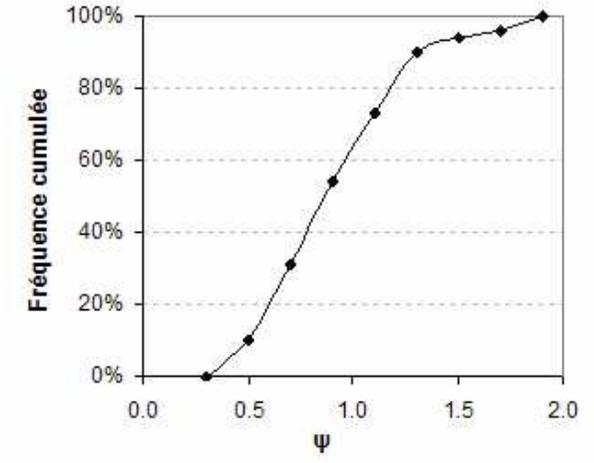
C 8 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



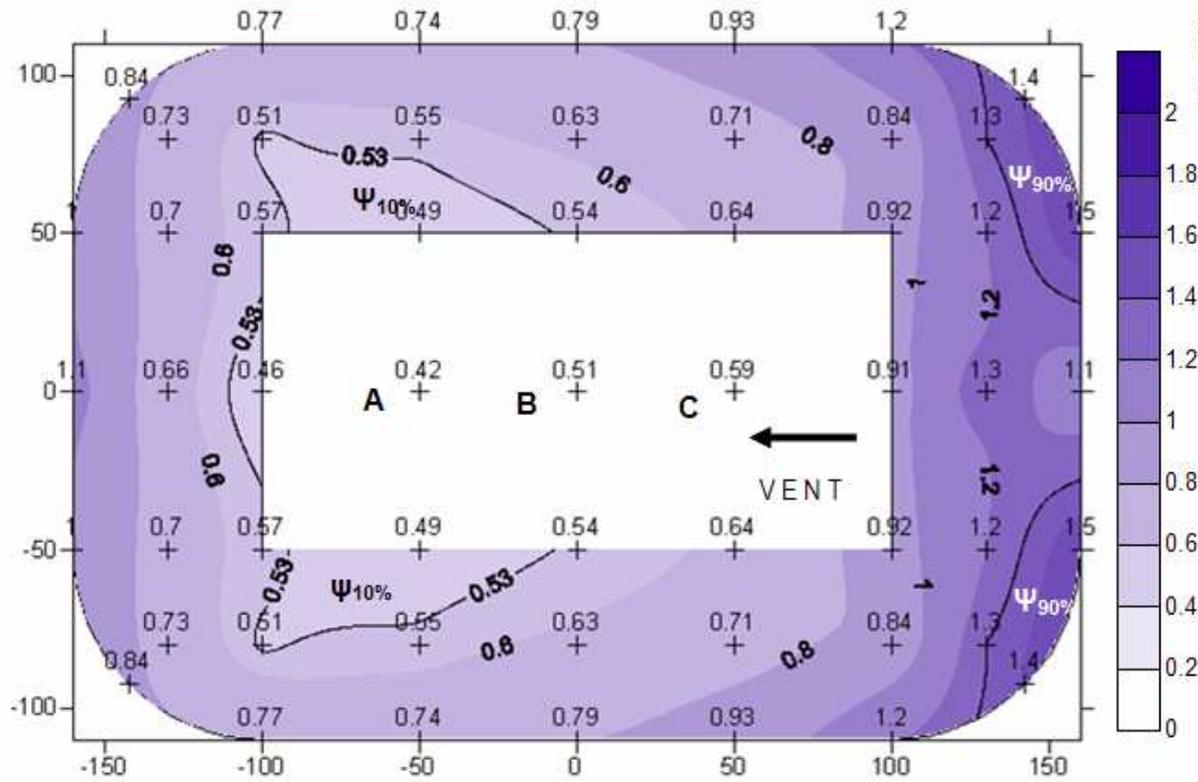
C 8 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



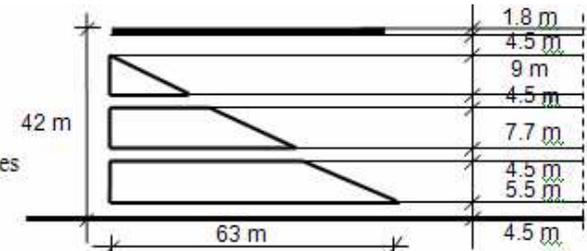
C 8 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ



C 8 - INCIDENCE LONGITUDINALE

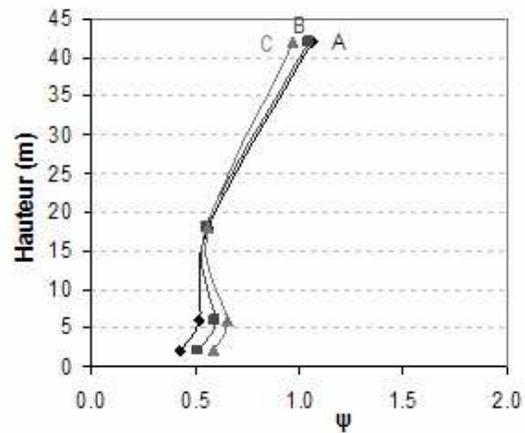


façade
divisée
par 4
brèches
horizontales

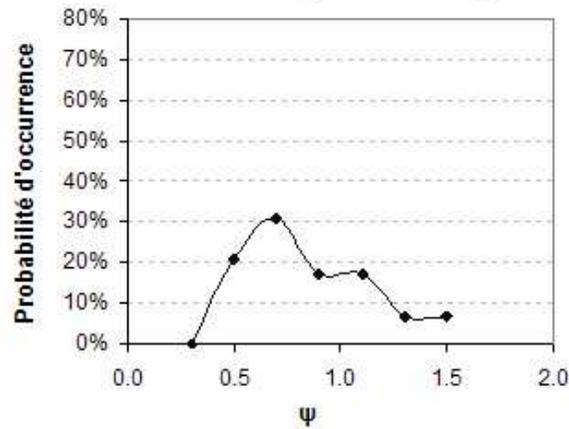


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.86
$\sigma:$	0.29
$\Psi_{10\%}:$	0.53
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	4489
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	8.18
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.62
$\Psi_{90\%}:$	1.31
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	2797
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	5.10
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.52

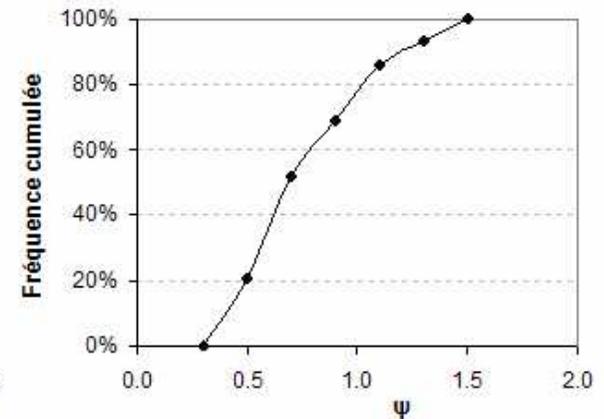
C 8 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



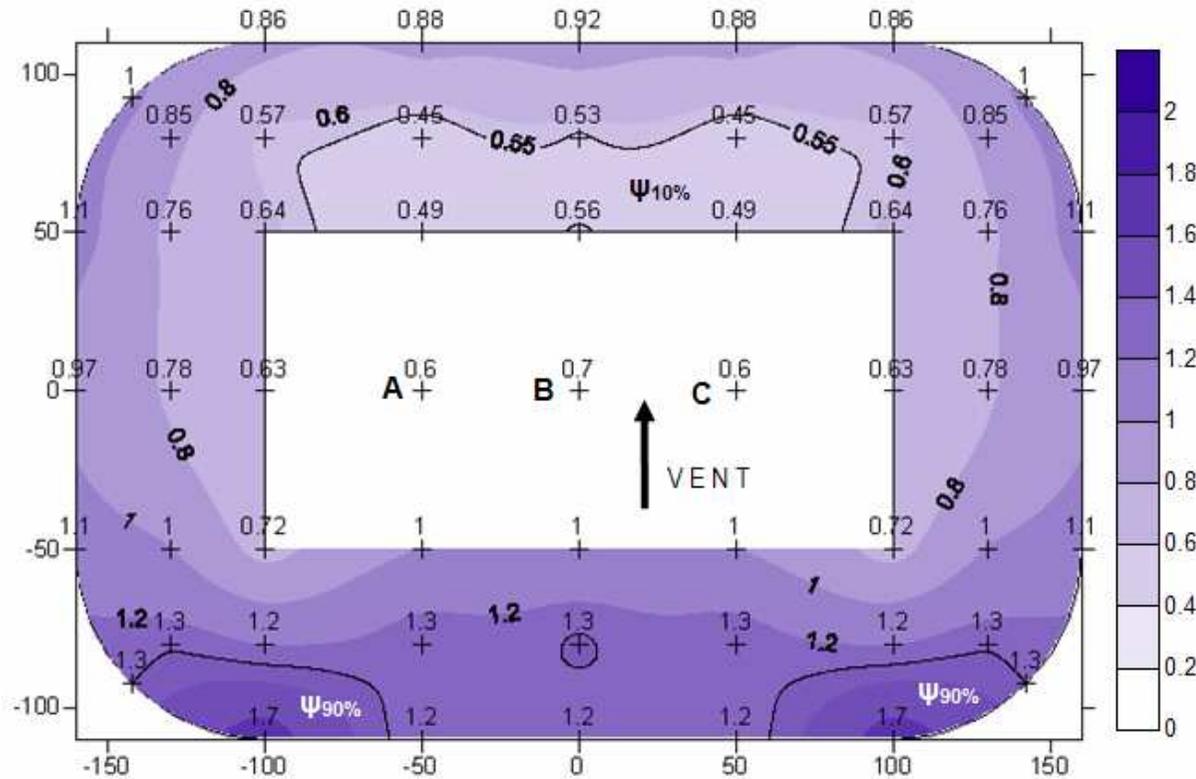
C 8 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



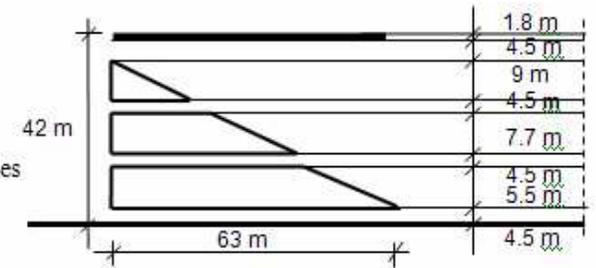
C 8 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ



C 8 - INCIDENCE TRANSVERSALE

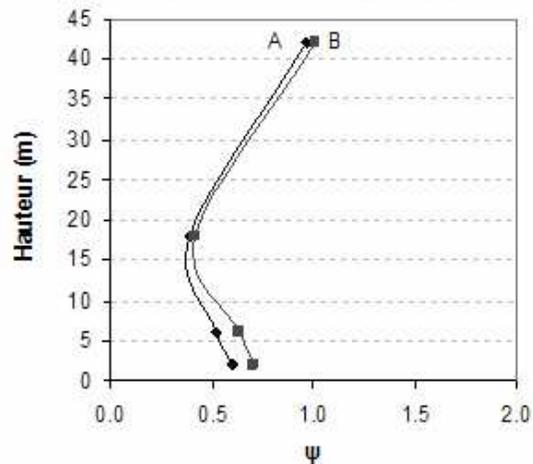


façade
divisée
par 4
brèches
horizontales

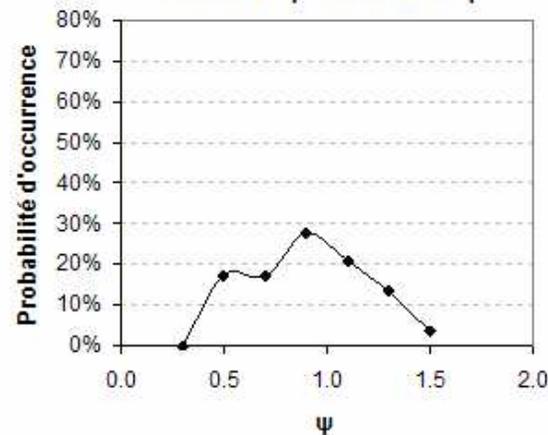


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.94
$\sigma:$	0.30
$\Psi_{10\%}:$	0.55
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	6319
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	11.51
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.59
$\Psi_{90\%}:$	1.30
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	3825
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	6.97
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.38

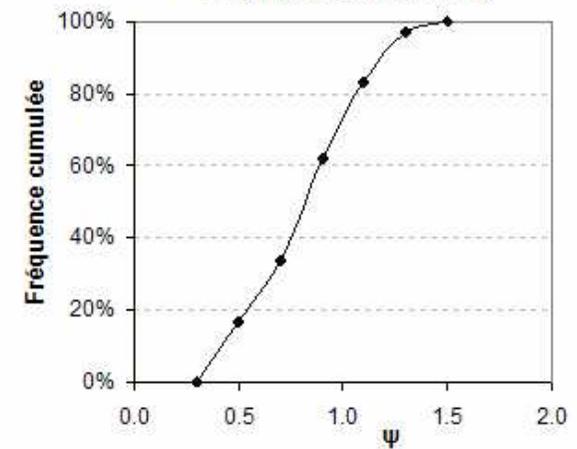
C 8 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



C 8 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ

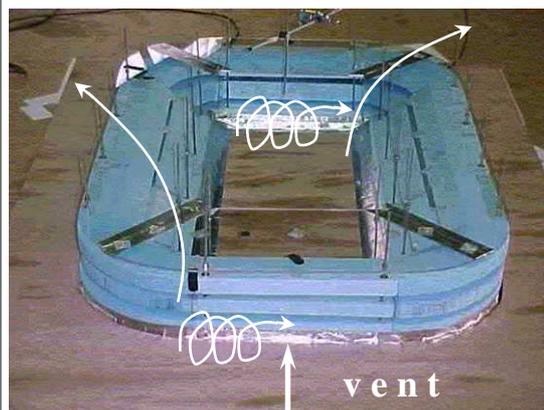
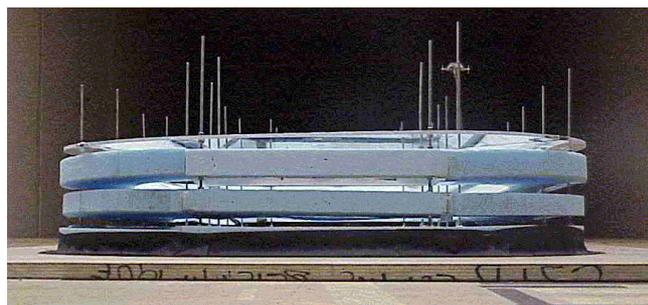


C 8 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CHAPITRE III. : ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

CONFIGURATION:	C9 – FACADE DIVISEE PAR 3 BRECHES HORIZONTALES						
COMPARER A :	C1, C4, C8, C10, C17, C18, C19						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.92	0.33	1.42	0.36	1.54	0.51	7.05
Longitudinale	0.80	0.34	1.37	0.43	1.71	1.73	7.17
Transversale	0.84	0.26	1.34	0.31	1.60	0.46	5.97



Description : La façade de cette configuration est divisée par trois brèches horizontales périphériques uniformément réparties. Elles séparent les différents niveaux des gradins entre eux et la toiture des gradins. Chacune des brèches mesure 4.5 mètres de hauteur.

La brèche entre le niveau de l'aire de jeu et le premier niveau des gradins est fermée.

La porosité de la configuration présente équivaut à environ 30%.

La toiture est continue et couvre l'intégralité des gradins.

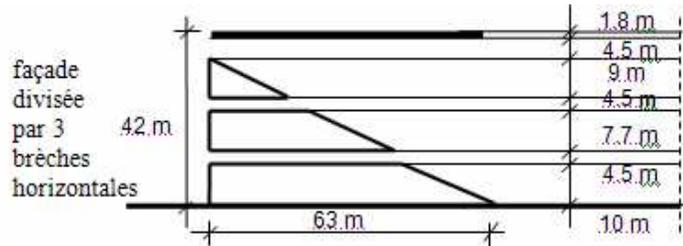
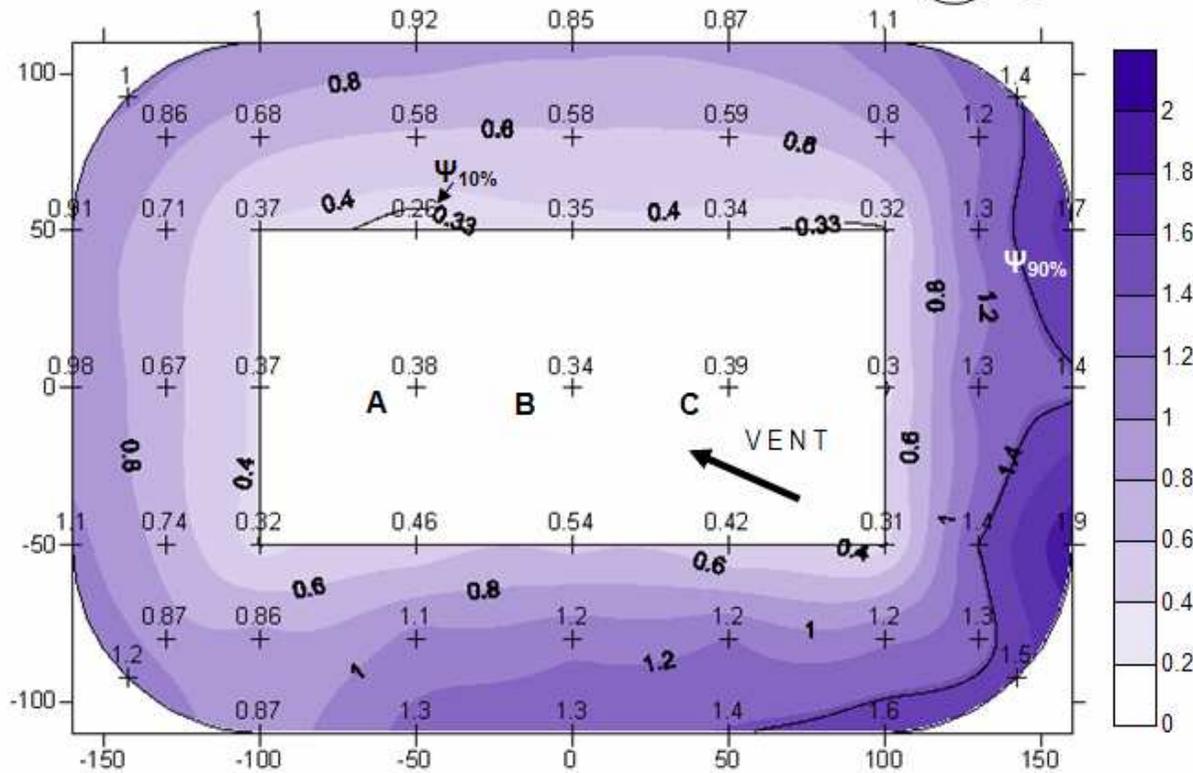
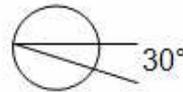
Résultats : Les gradins de cette configurations sont plus fortement ventilés que ceux de la première configuration : les valeurs de $\bar{\Psi}$ sont augmentées d'environ 66%, par rapport à celles de la première configuration. En même temps, par rapport à la configuration précédente (C8), la configuration présente fournit une protection plus importante aux spectateurs en particulier à ceux qui se trouvent au niveau des parties basses des gradins. Cependant, un stade avec une façade fermée (C4) a une capacité protectrice encore plus élevée que la configuration présente.

L'aire de jeu et les parties basses des gradins sont très protégées, plus encore que dans la première configuration. Néanmoins, des valeurs de Ψ très élevées (1.8 et 1.9) ont été mesurées pour les trois incidences, au niveau des parties hautes des gradins au vent.

Les accélérations concernent des surfaces larges. De plus, l'écoulement dans cette configuration est moins homogène que celui de la configuration précédente.

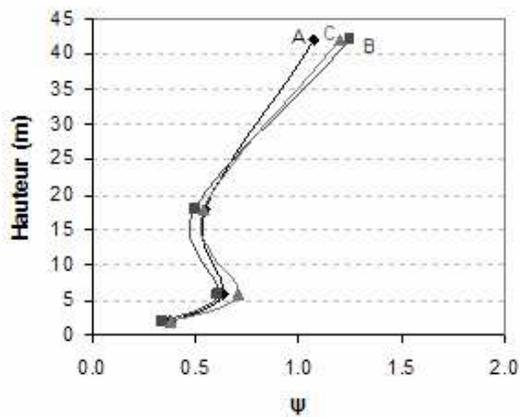
L'aire des zones de calme est très réduite.

C 9 - INCIDENCE DIAGONALE

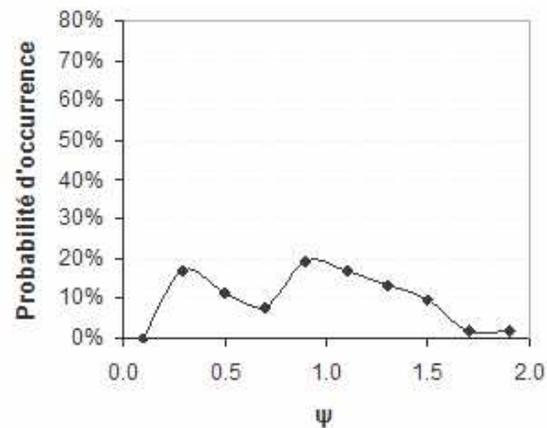


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.92
$\sigma:$	0.42
$\Psi_{10\%}:$	0.33
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	281
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	0.51
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.36
$\Psi_{90\%}:$	1.42
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	3870
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	7.05
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.54

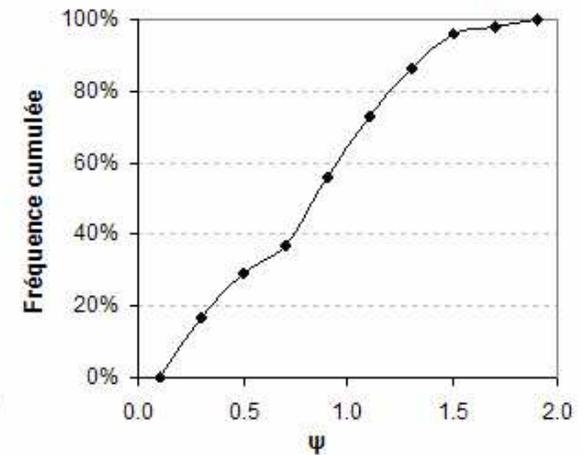
C 9 - incidence diagonale;
Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



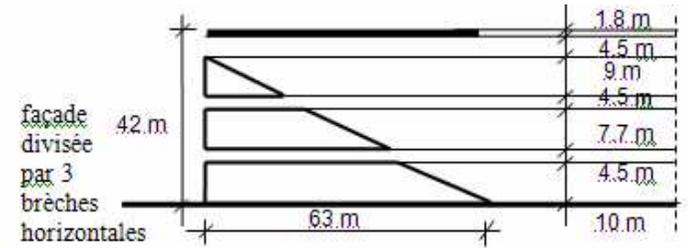
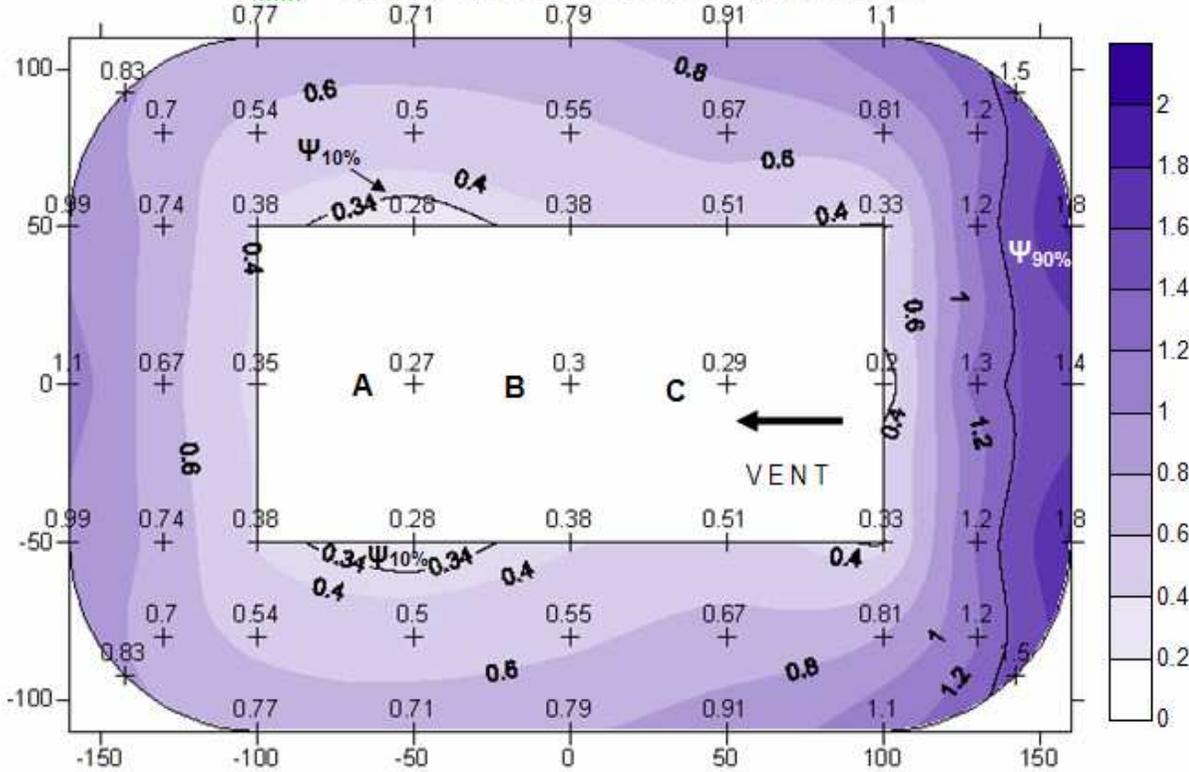
C 9 - incidence diagonale;
Densité de probabilité de ψ



C 9 - incidence diagonale;
Fréquence cumulée de ψ

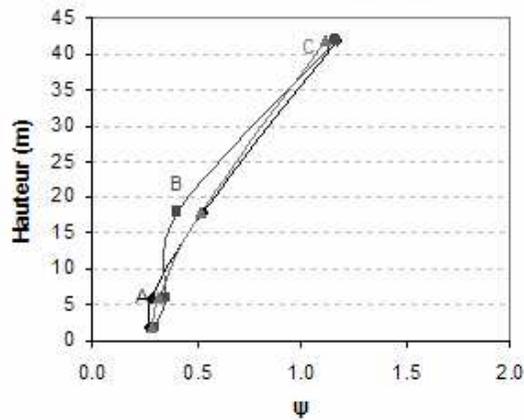


C 9 - INCIDENCE LONGITUDINALE

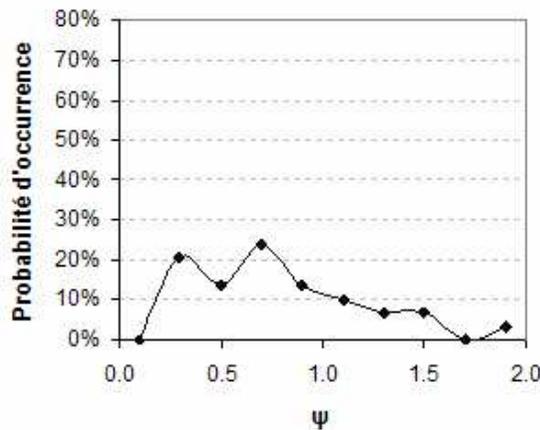


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.80
$\sigma:$	0.40
$\Psi_{10\%}:$	0.34
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	948
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	1.73
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.43
$\Psi_{90\%}:$	1.37
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	3933
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	7.17
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.71

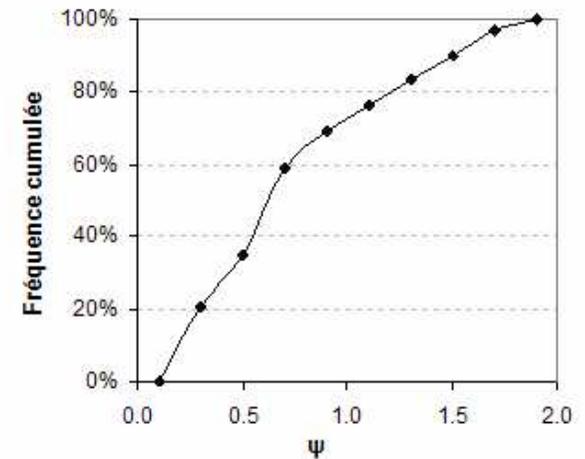
C 9 - incidence longitudinale;
Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



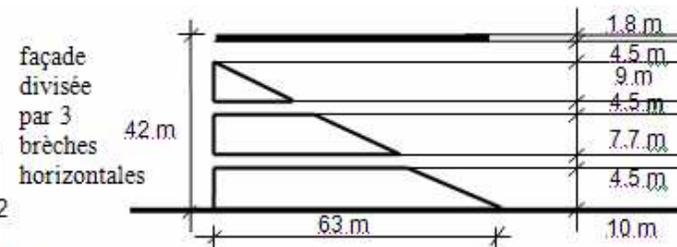
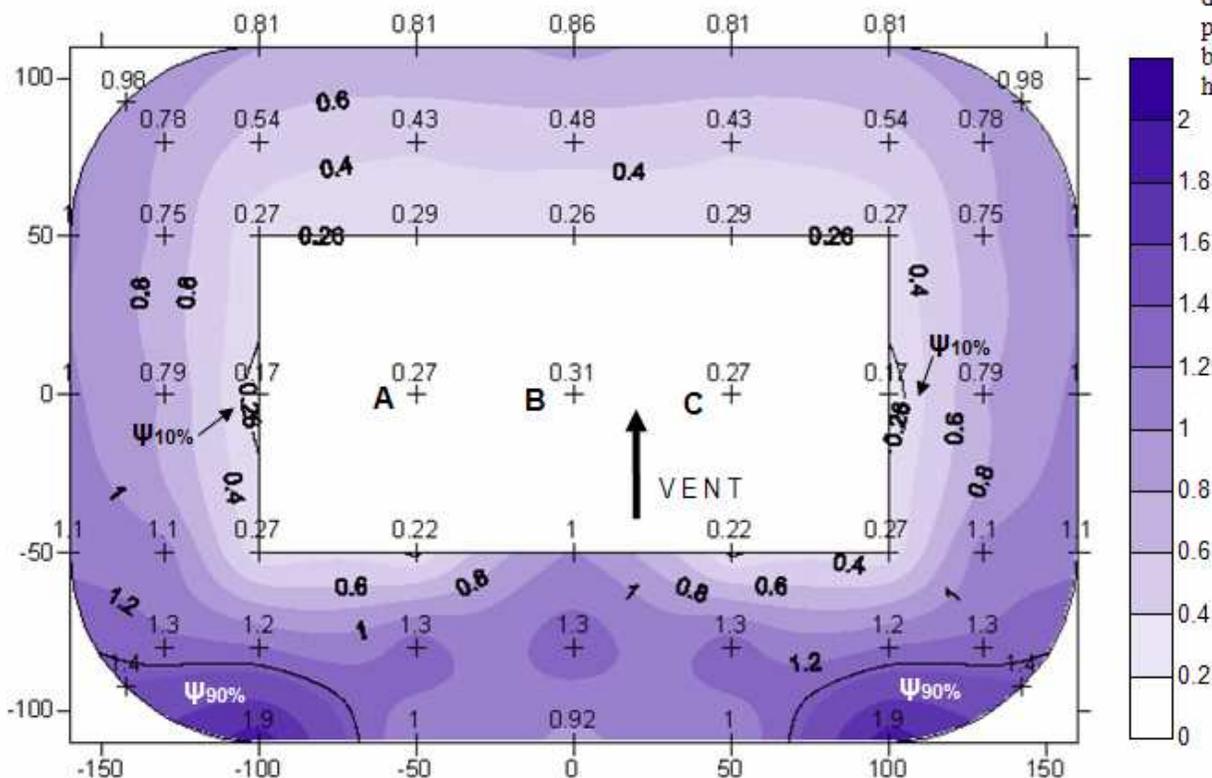
C 9 - incidence longitudinale;
Densité de probabilité de ψ



C 9 - incidence longitudinale;
Fréquence cumulée de ψ

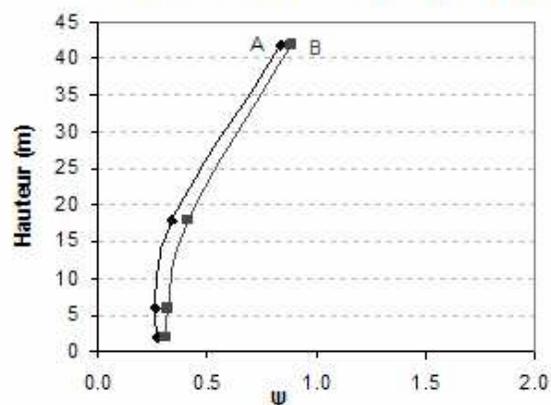


C 9 - INCIDENCE TRANSVERSALE

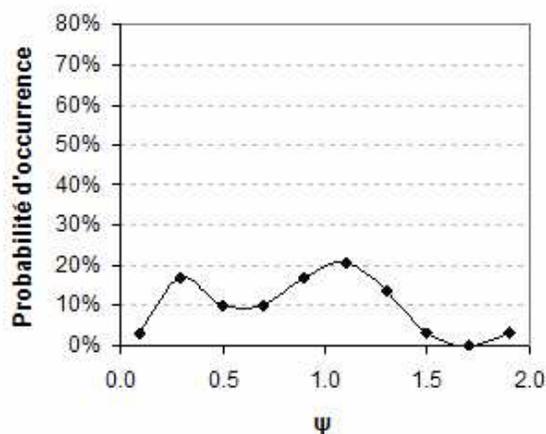


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.84
$\sigma:$	0.43
$\Psi_{10\%}:$	0.26
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	253
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	0.46
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.31
$\Psi_{90\%}:$	1.34
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	3278
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	5.97
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.60

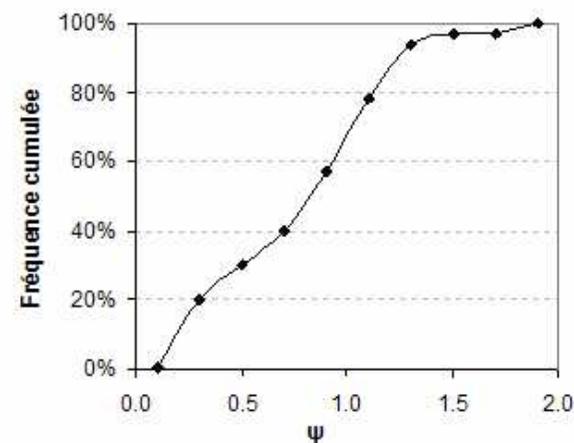
C 9 - incidence transversale;
Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



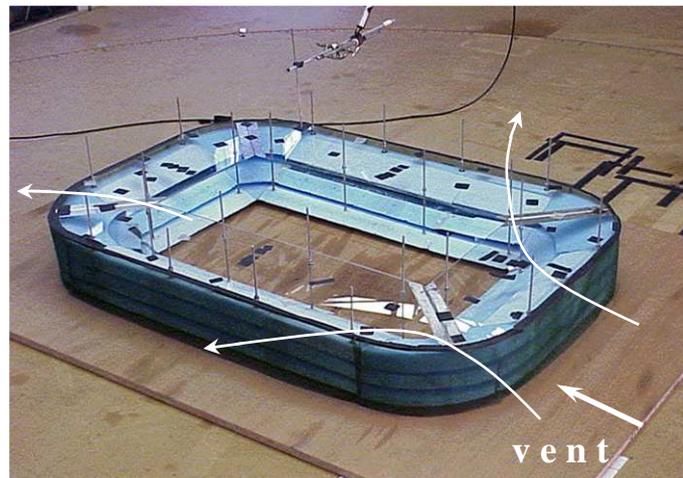
C 9 - incidence transversale;
Densité de probabilité de ψ



C 9 - incidence transversale;
Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C10 – FACADE DIVISEE PAR 4 BRECHES HORIZONTALES + COUVERTE PAR UNE GRILLE DE POROSITE A 50%						
COMPARER A :	C1, C4, C8, C9, C17, C18, C19						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.60	0.34	0.99	0.57	1.65	6.12	5.18
Longitudinale	0.60	0.30	0.86	0.50	1.43	16.02	13.24
Transversale	0.57	0.36	0.82	0.63	1.45	9.03	14.73



Description : La façade de cette configuration est divisée par quatre brèches horizontales périphériques uniformément réparties et couverte par une grille de porosité à 50%. Les brèches séparent les différents niveaux des gradins et la toiture des gradins. Chacune d'elles mesure 4.5 mètres de hauteur. La porosité de cette configuration (le rapport de l'aire des ouvertures et de la surface totale de la façade) équivaut environ 20%.

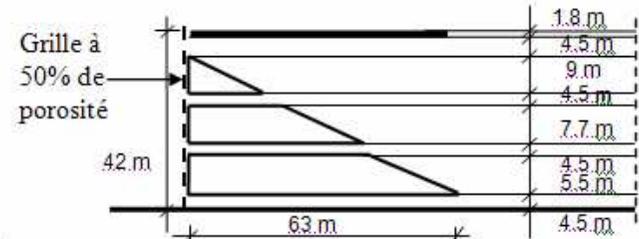
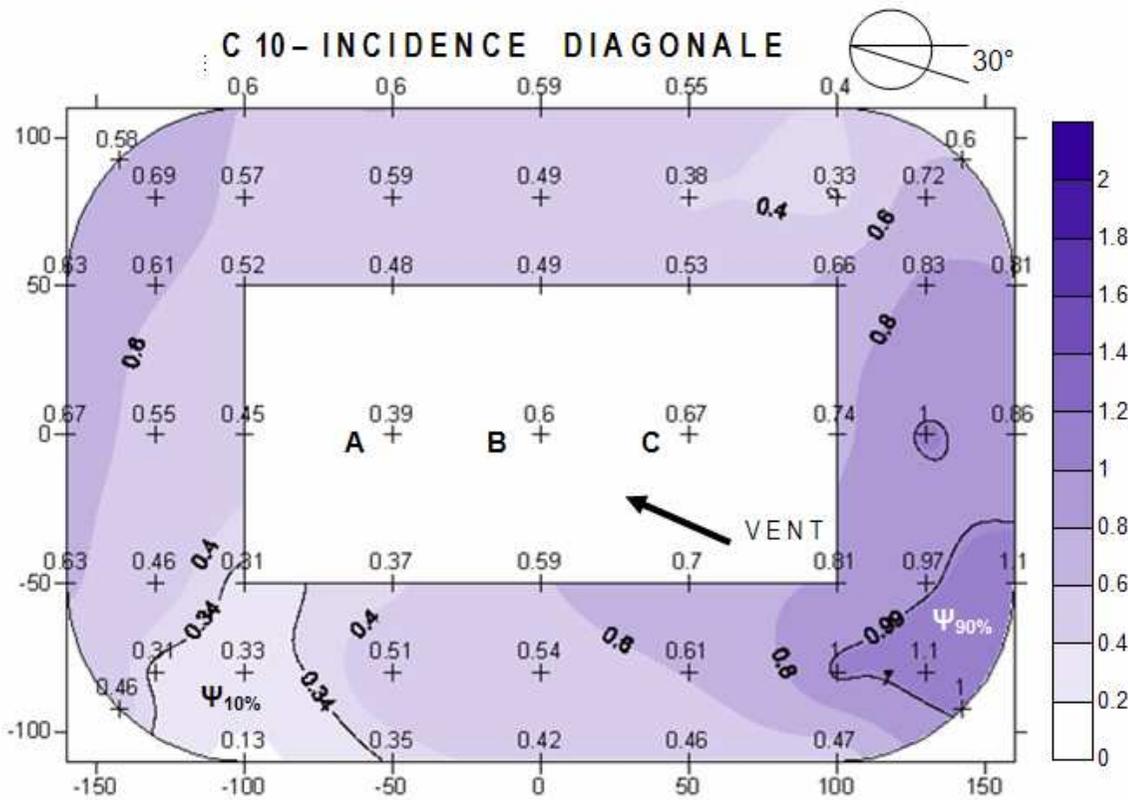
La toiture est horizontale et elle couvre l'intégralité des gradins.

Résultats : Cette configuration est très peu sensible à l'incidence du vent.

Les valeurs de $\bar{\Psi}$ sont légèrement plus élevées, que celles de la première configuration et significativement plus importantes que celles de la quatrième configuration. Cependant, ces valeurs sont très réduites si on les compare à celles de configuration dont la façade est divisée par quatre brèches horizontales non couvertes par des écrans brise-vent (C8).

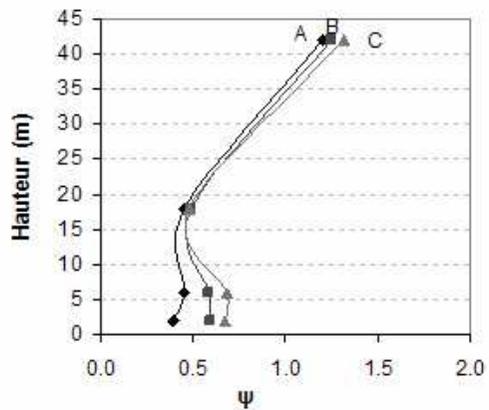
L'occultation des brèches par une grille qui sert d'écran brise-vent permet l'équilibrage des pressions entre l'extérieur et l'intérieur du stade out en réduisant les éventuelles effets de jets. Ainsi les effets de recirculation de l'écoulement dans la cavité formée par le stade sont amoindris. En conséquence, l'écoulement est légèrement plus homogène que dans le cas d'une configuration identique sans écrans brise-vent (C8).

La capacité protectrice de cette configuration est plus importante que celle de la première configuration et que celle de huitième configuration. Cependant elle reste inférieure à celle de la configuration dont la façade est complètement fermée (C4).

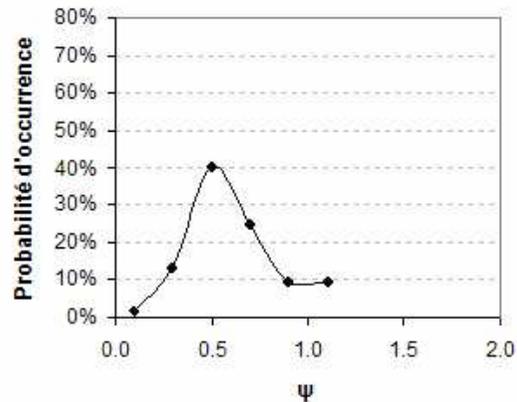


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.60
$\sigma:$	0.21
$\Psi_{10\%}:$	0.34
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3361
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	6.12
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.57
$\Psi_{90\%}:$	0.99
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	2846
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	5.18
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.65

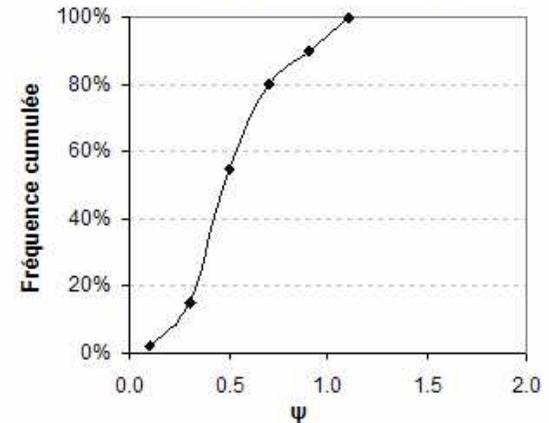
C 10 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu

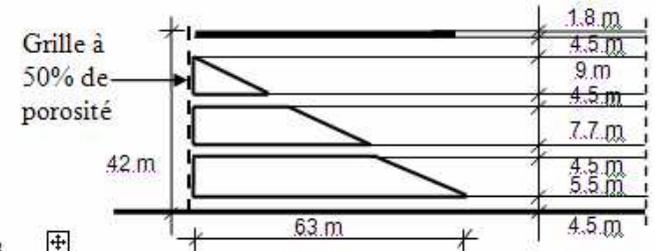
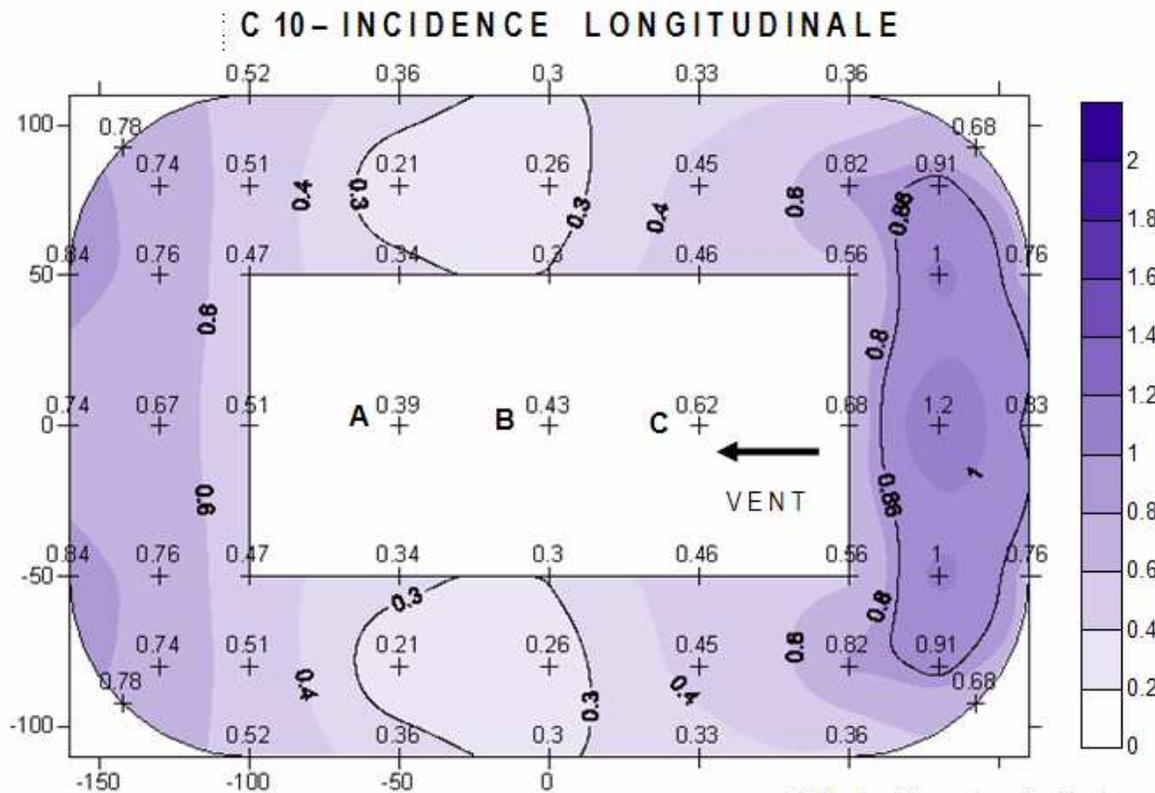


C 10 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



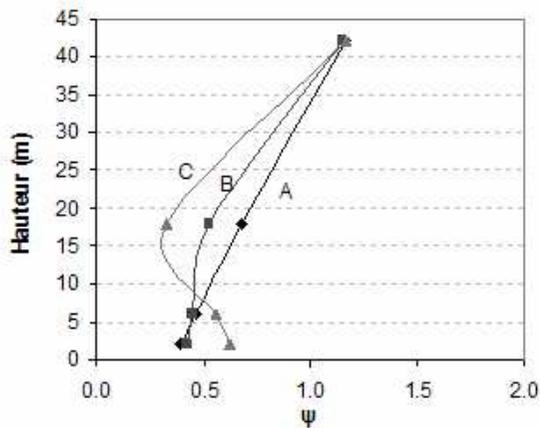
C 10 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ



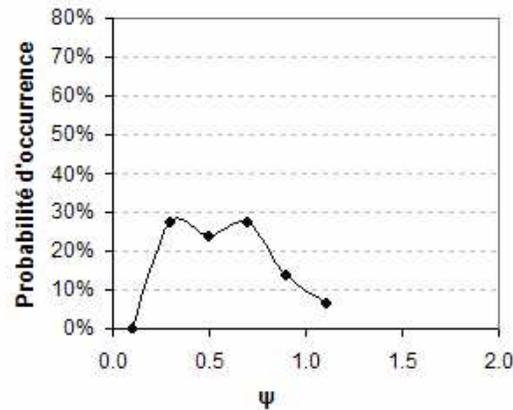


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.60
$\sigma:$	0.25
$\Psi_{10\%}:$	0.30
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	8792
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	16.02
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.50
$\Psi_{90\%}:$	0.86
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	7268
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	13.24
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.43

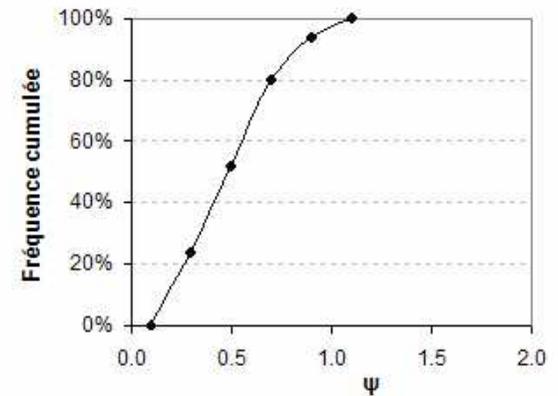
C 10 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu

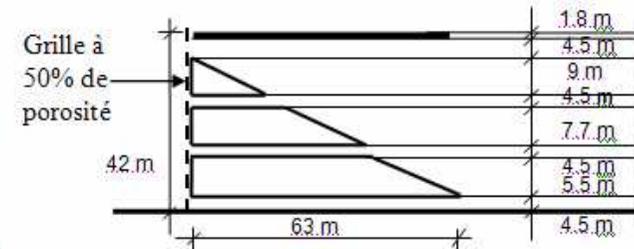
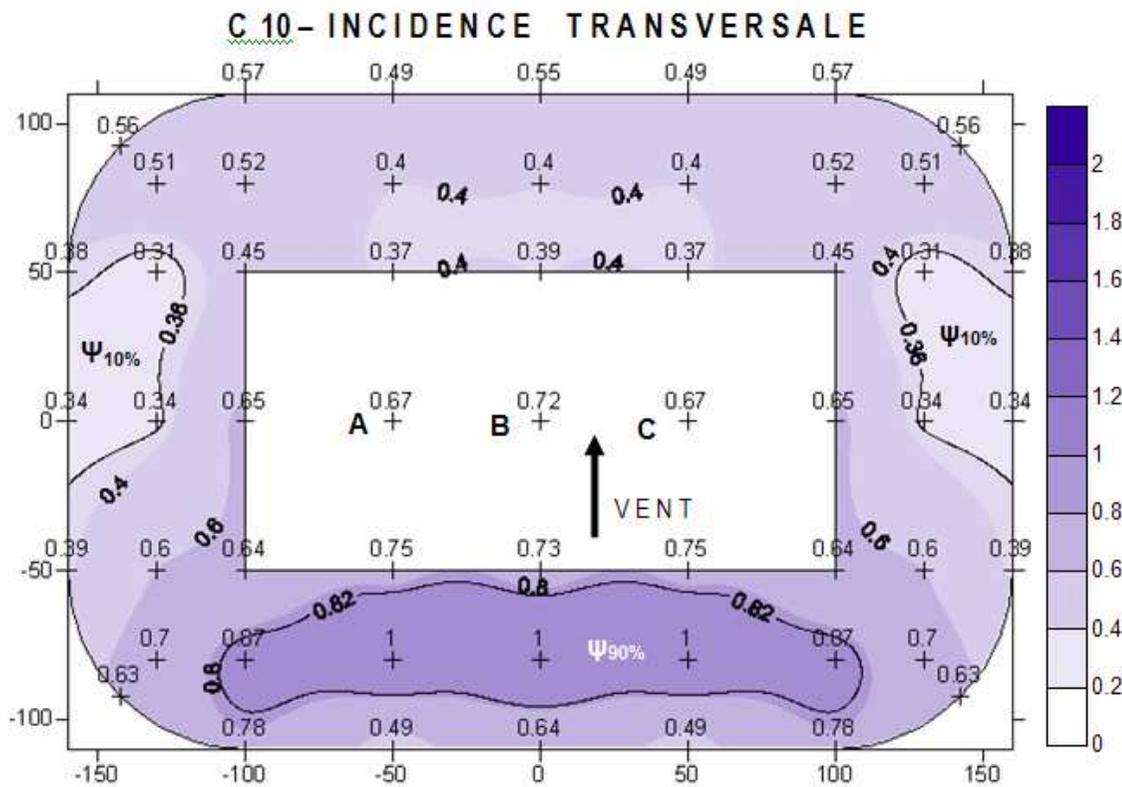


C 10 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ

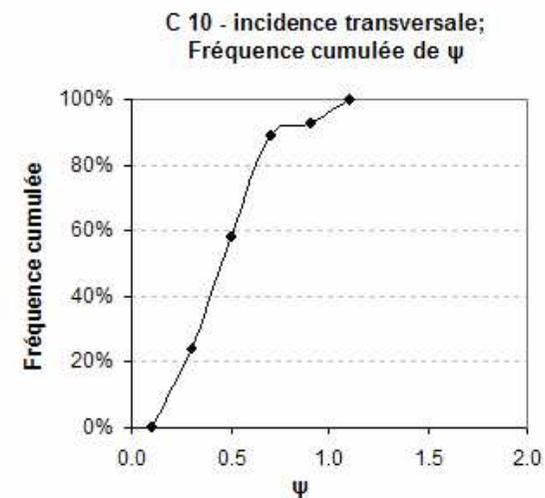
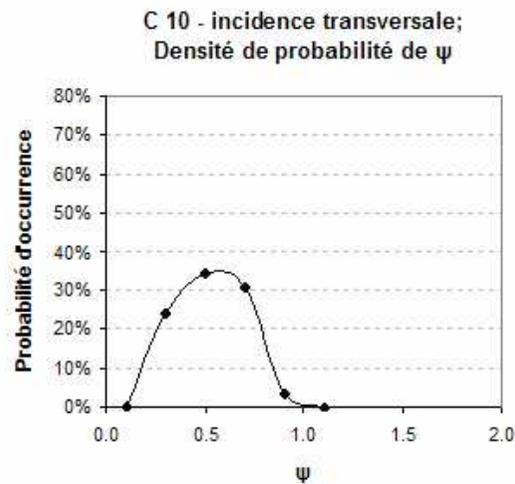
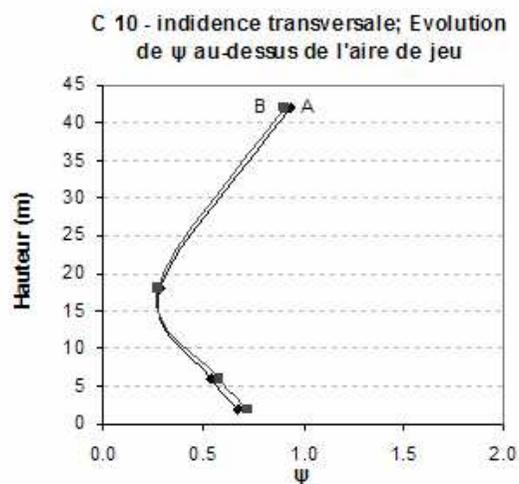


C 10 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

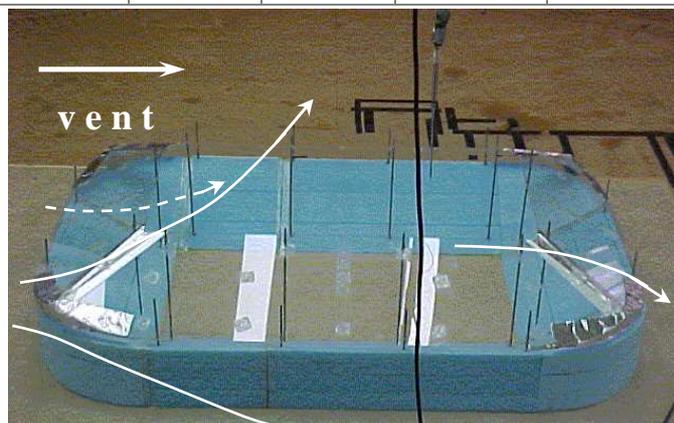
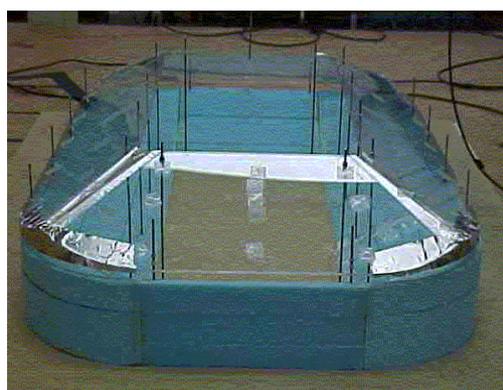




$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.57
$\sigma:$	0.19
$\Psi_{10\%}:$	0.36
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	4959
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	9.03
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.63
$\Psi_{90\%}:$	0.82
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	8083
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	14.73
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.45



CONFIGURATION:	C11 – TOITURE MONTANTE DE 30° VERS L'AIRE DE JEU						
COMPARER A :	C1, C2, C3, C12						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.68	0.30	1.08	0.56	1.59	8.31	6.14
Longitudinale	0.51	0.25	0.80	0.49	1.57	10.26	3.47
Transversale	0.50	0.26	0.79	0.52	1.58	6.83	2.15



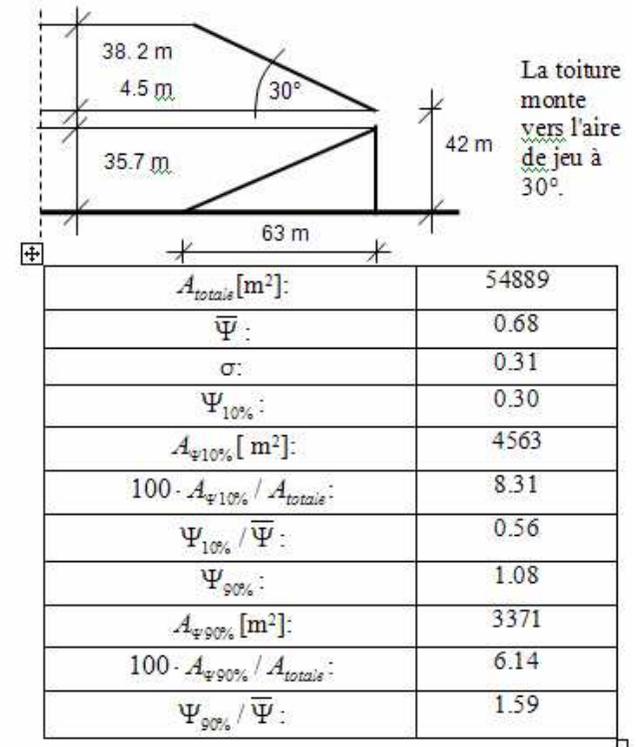
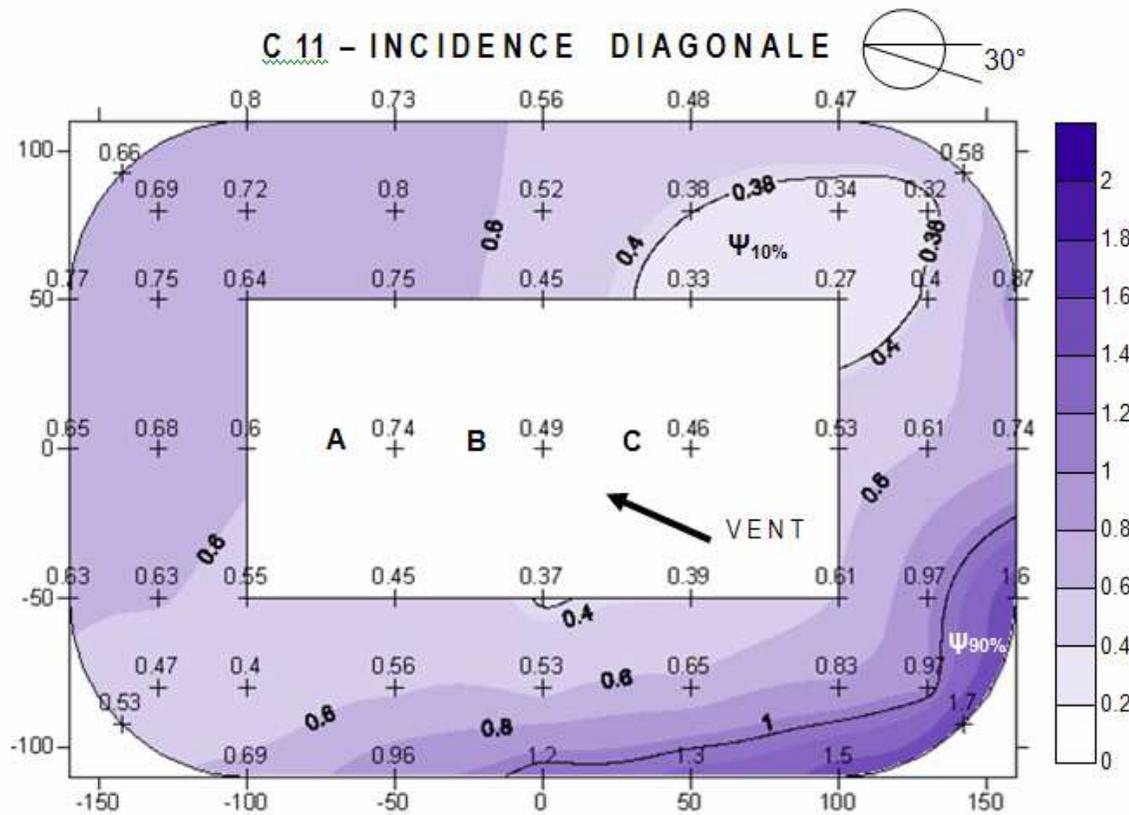
Description : Cette configuration possède une toiture qui est inclinée à 30 degrés qui monte vers l'aire de jeu. Elle couvre l'intégralité des gradins et en est séparée par une brèche horizontale de hauteur 4.5 mètres.

Résultats : Les zones d'accélération apparaissent au niveau des parties hautes des gradins au vent et s'étendent jusqu'aux parties hautes des tribunes latérales. Les zones de calmes se trouvent au niveau des parties basses des tribunes au vent et sont relativement étendues : 7-10% de la surface totale des gradins.

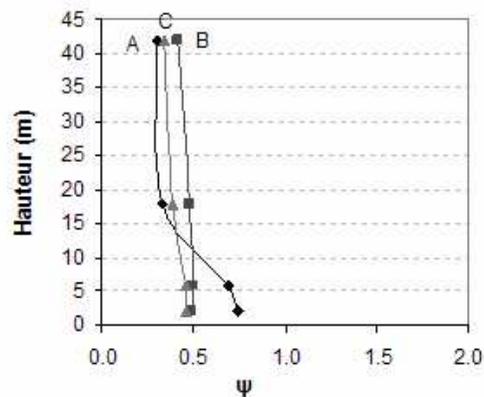
Cette configuration est légèrement plus ventilée que la première configuration, ce qui est indiqué par les valeurs de $\bar{\Psi}$. Ces dernières varient en fonction de l'incidence, et présentent une sensibilité importante à la direction du vent : des différences notables existent surtout entre l'incidence diagonale et les incidences perpendiculaires à l'axe du stade (longitudinale et transversale).

L'homogénéité de l'écoulement pour les trois incidences ne diffère pas de celle de la première configuration. Cependant, au niveau de la partie haute des tribunes au vent des valeurs très importantes de Ψ ont été mesurées : 1.7 et 1.6. Ceci peut être dû au fait que la toiture de pente importante provoque la retombée du flux dans la cavité formée par les tribunes et la toiture du stade.

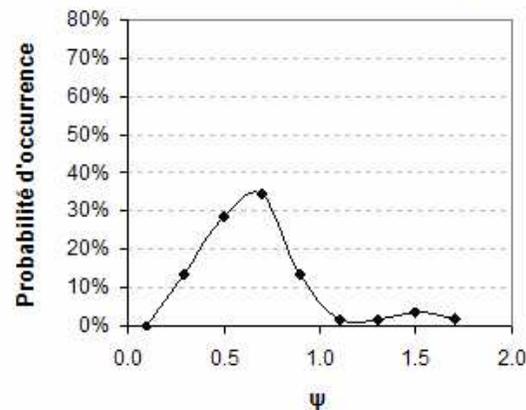
Cependant, l'écoulement au niveau des tribunes sous le vent est pour les trois incidences très homogène.



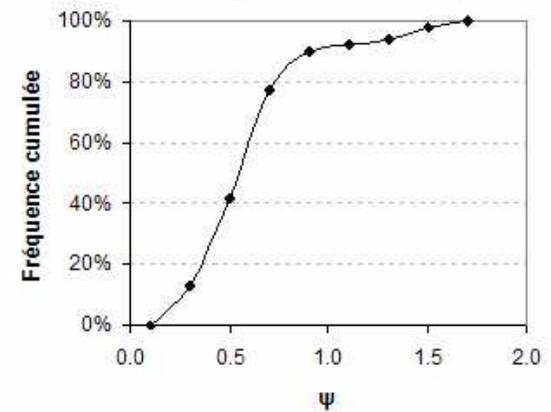
C 11 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu

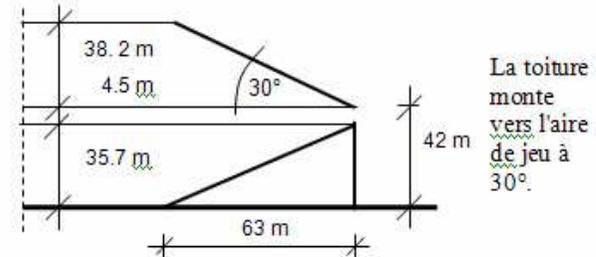
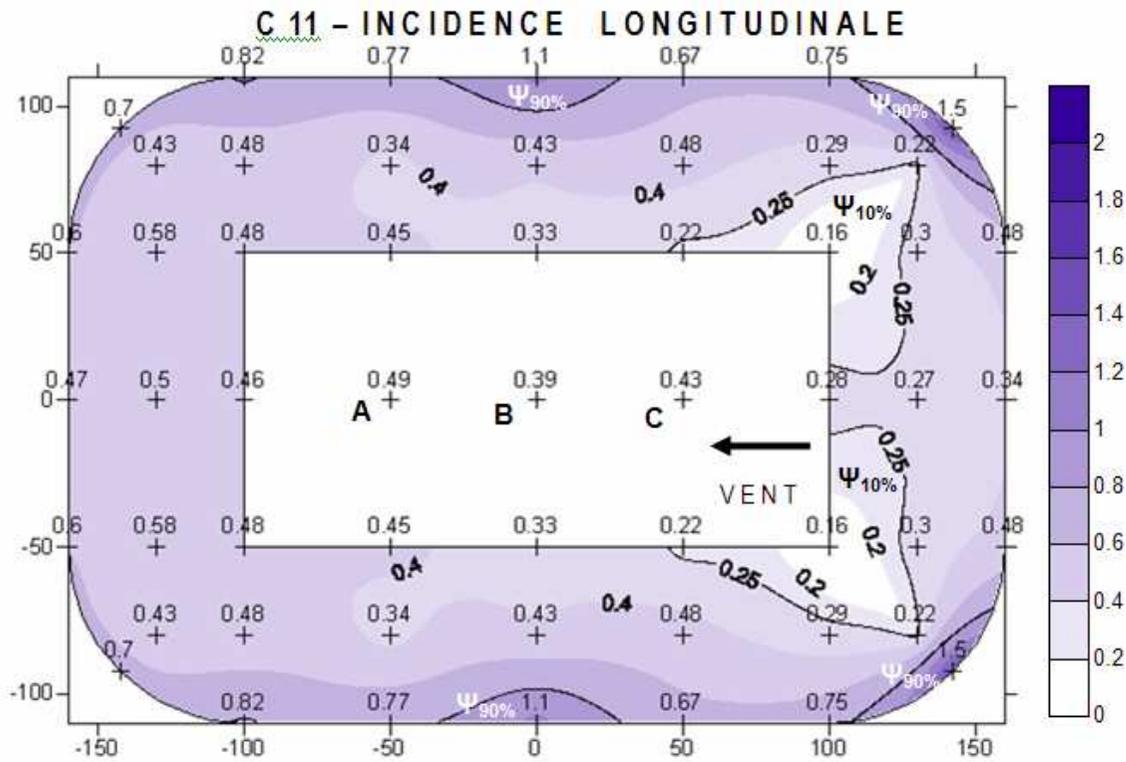


C 11 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ

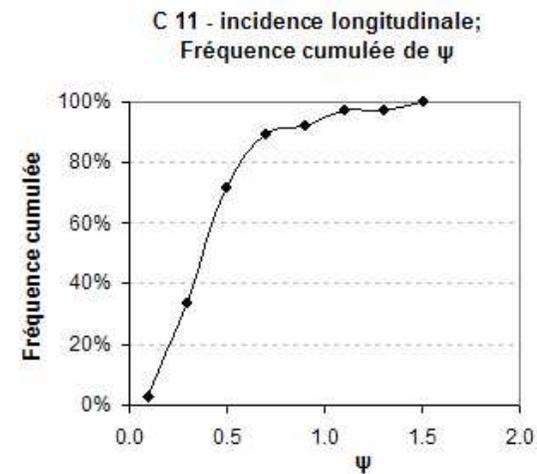
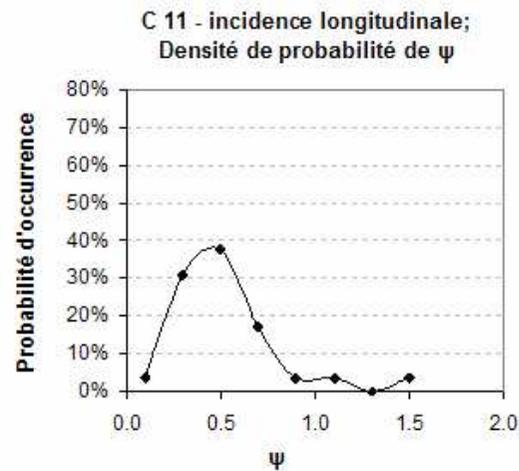
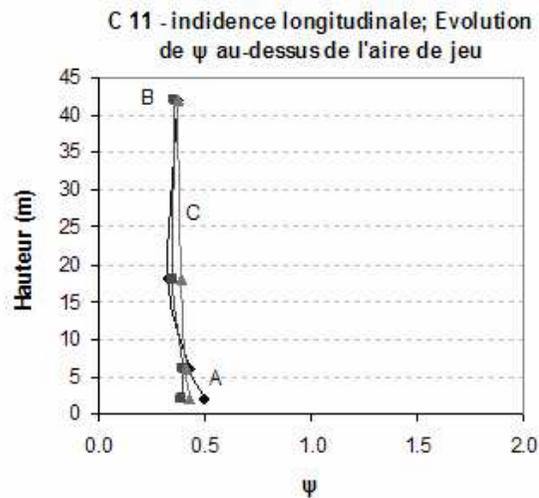


C 11 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

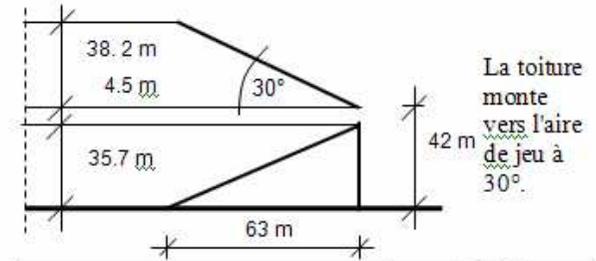
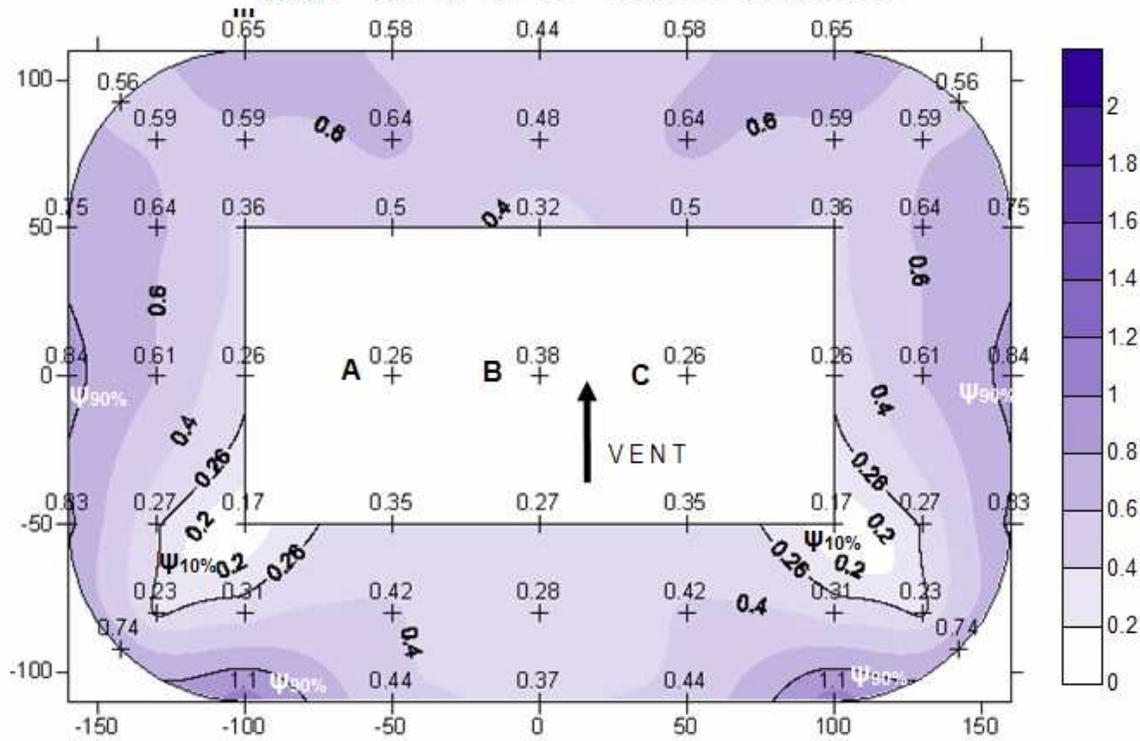




$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi} :$	0.51
$\sigma:$	0.27
$\Psi_{10\%} :$	0.25
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	5631
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale} :$	10.26
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi} :$	0.49
$100 \cdot \Psi_{10\%} \cdot A_{\Psi_{10\%}} / \bar{\Psi} \cdot A_{totale} :$	5.03
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1903
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale} :$	3.47
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi} :$	1.57

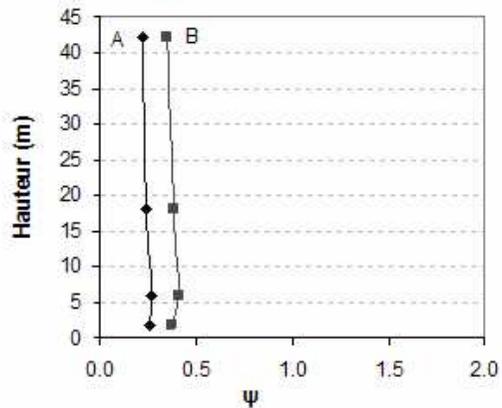


C 11 - INCIDENCE TRANSVERSALE

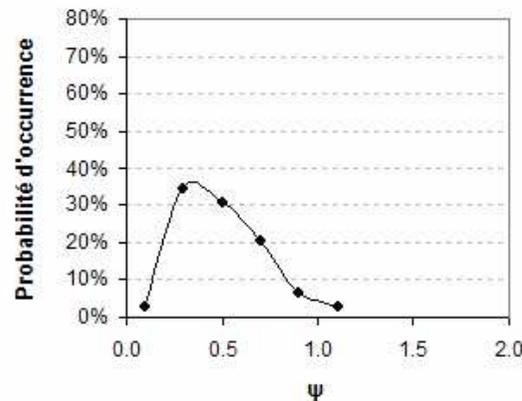


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.50
$\sigma:$	0.22
$\Psi_{10\%}:$	0.26
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3749
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	6.83
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.52
$\Psi_{90\%}:$	0.79
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1180
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	2.15
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.58

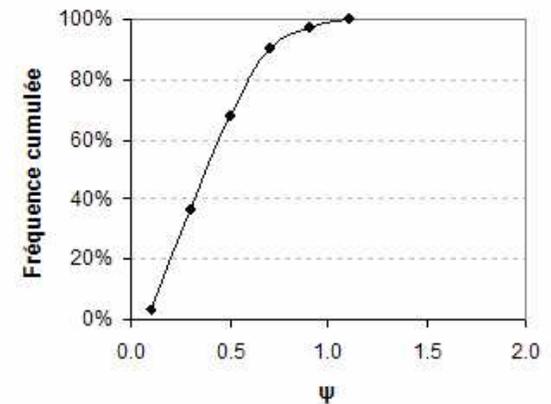
C 11 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



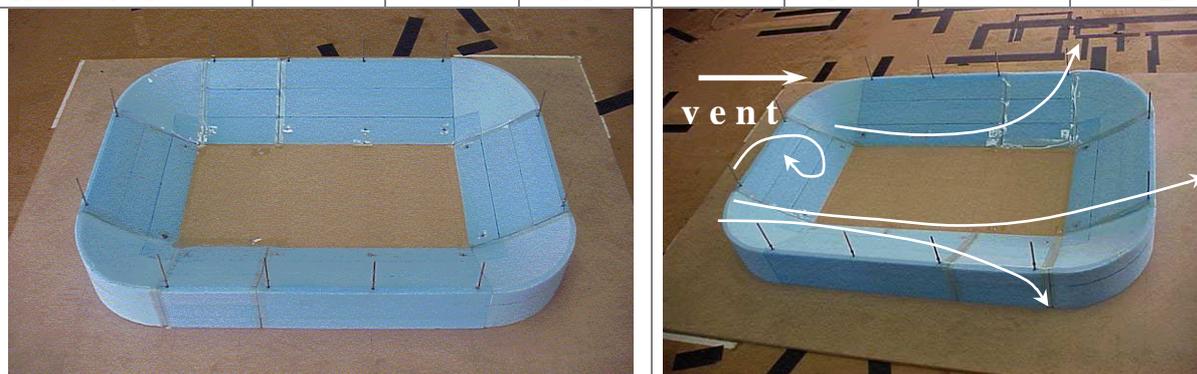
C 11 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 11 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C12 – STADE SANS TOITURE						
COMPARER A :	C1, C2, C3, C4, C8, C9, C10, C11						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.86	0.56	1.34	0.65	1.56	5.31	2.84
Longitudinale	0.75	0.46	1.12	0.61	1.49	6.40	0.72
Transversale	0.75	0.46	1.16	0.59	1.43	6.40	0.72



Description : Cette configuration ne comporte pas de toiture. En conséquence elle ne fournit pas de protection contre les facteurs climatiques : elle ne protège pas les spectateurs du soleil, du vent, de la pluie etc.

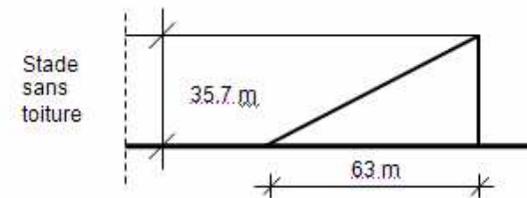
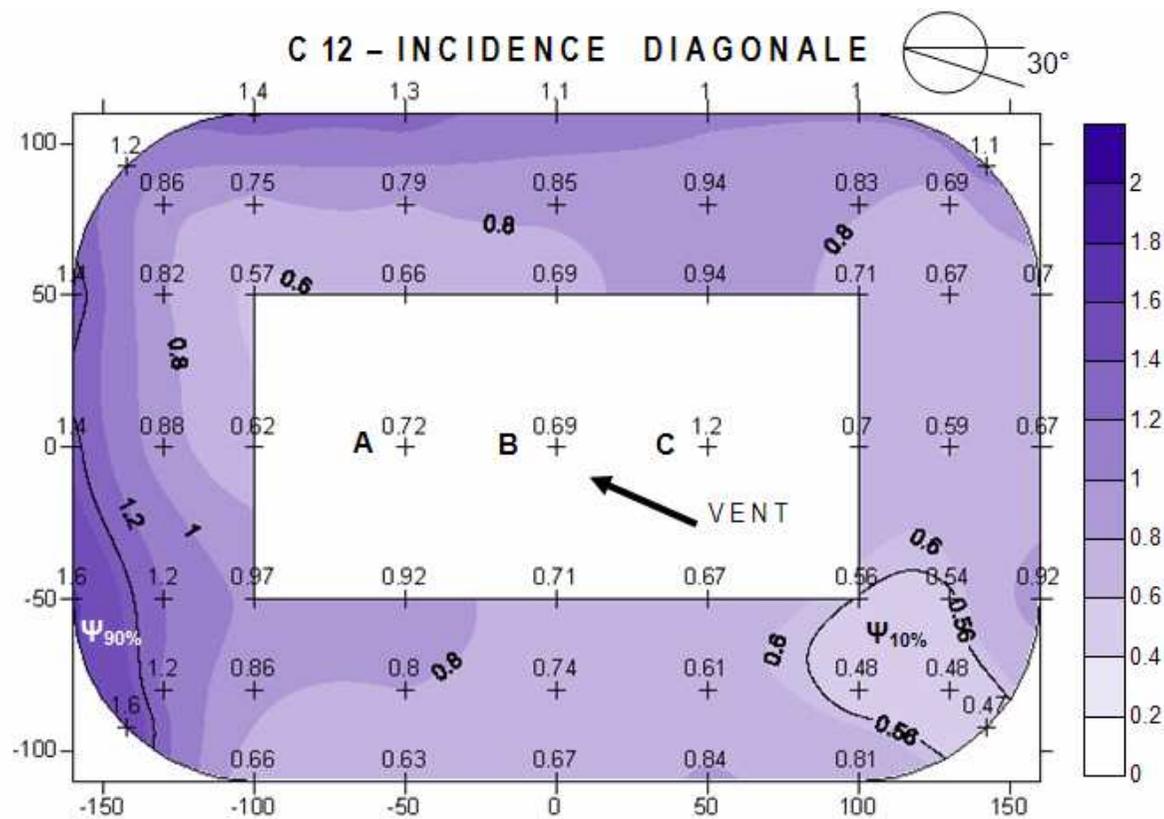
Résultats : **L'absence de toiture implique une ventilation intense au niveau de l'intégralité des gradins: l'écoulement franchît la tribune amont et retombe directement dans l'enceinte du stade en formant un rouleau.** C'est pour cela que les valeurs de $\bar{\Psi}$ sont augmentées de 50% par rapport à la première configuration et les valeurs de $\Psi_{10\%}$ ont atteint celles de $\bar{\Psi}$ appartenant à la première configuration.

Cette configuration présente une sensibilité modérée à l'incidence : les valeurs de $\bar{\Psi}$ varient entre 0.75 et 0.86, celles de $\Psi_{10\%}$ entre 0.46 et 0.56. Néanmoins, la variation des valeurs de $\Psi_{90\%}$ avec l'incidence est légèrement plus importante que celle de la première configuration.

La comparaison des résultats de cette configuration à ceux des configurations comportant une façade fermée et une toiture met en évidence qu'en général la toiture a un effet protecteur. Cependant, une toiture débordant vers l'extérieur (C5) induit une ventilation plus intense dans les zones concernées par le $\Psi_{90\%}$ pour les incidences longitudinale et transversale : les valeurs de $\Psi_{90\%}$ correspondantes à la C5 dépassent celles de la configuration présente. De surcroît, pour l'incidence diagonale ces valeurs sont très proches l'une à l'autre : 1.30 (C5) et 1.34 (C12).

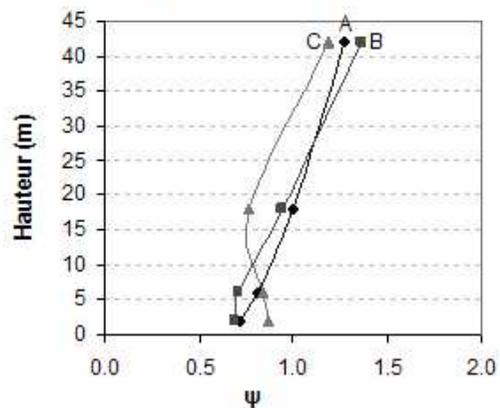
Une toiture plus éloignée des tribunes (C7) que dans la C1, induit une ventilation plus intense dans les zones concernées par le $\Psi_{90\%}$ pour l'incidence longitudinale.

Ceci indique qu'il existe des configurations où (pour certaines incidences du vent) la toiture ne protège pas les gradins d'une manière plus efficace que la configuration sans toiture.

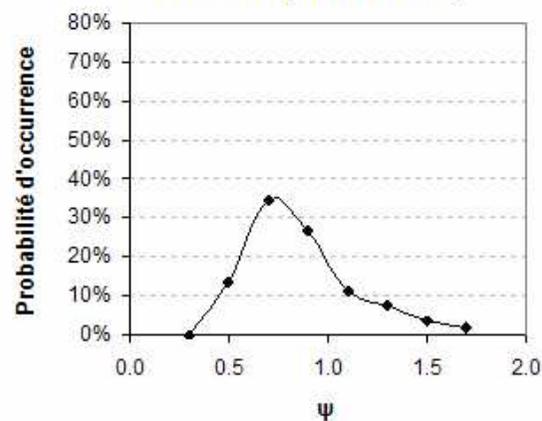


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.86
$\sigma:$	0.28
$\Psi_{10\%}:$	0.56
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	2916
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	5.31
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.65
$\Psi_{90\%}:$	1.34
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1558
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	2.84
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.56

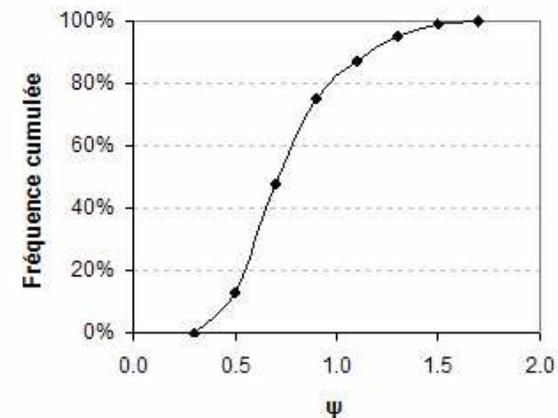
C 12 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



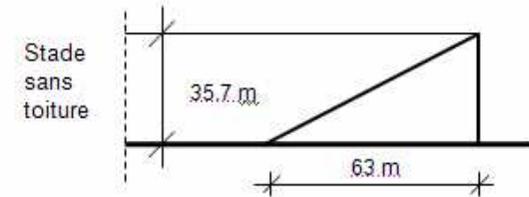
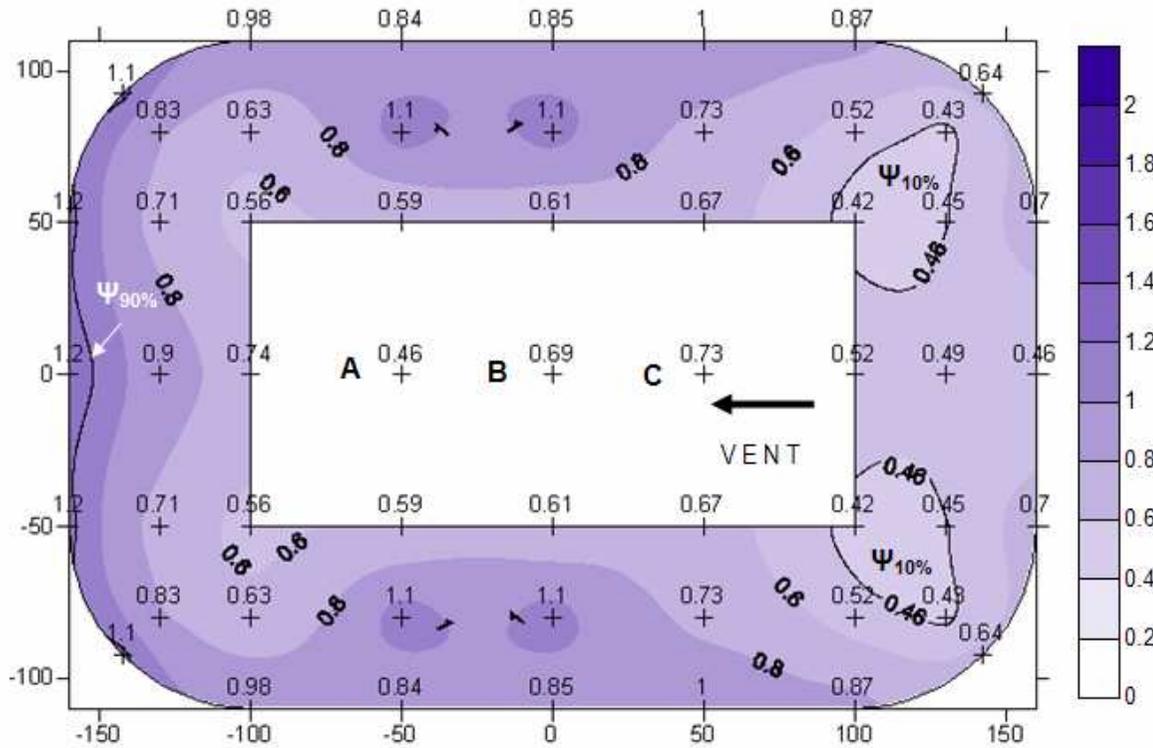
C 12 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 12 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

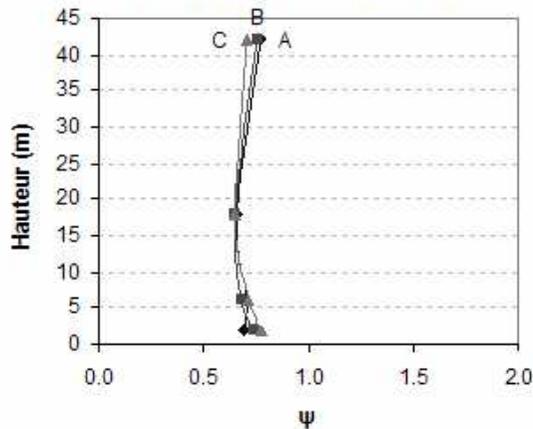


C 12 - INCIDENCE LONGITUDINALE

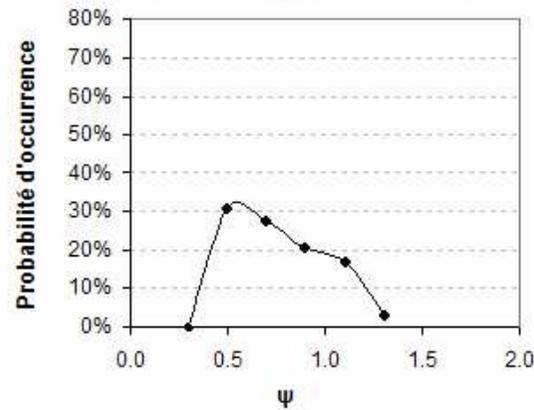


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.75
$\sigma:$	0.24
$\Psi_{10\%}:$	0.46
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3514
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	6.40
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.61
$\Psi_{90\%}:$	1.12
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	395
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	0.72
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.49

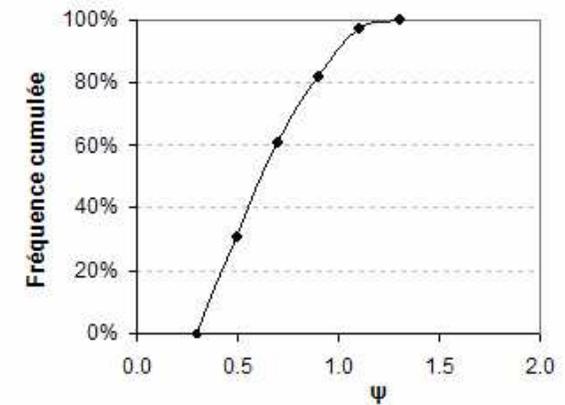
C 12 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeux



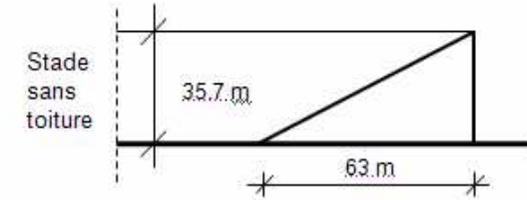
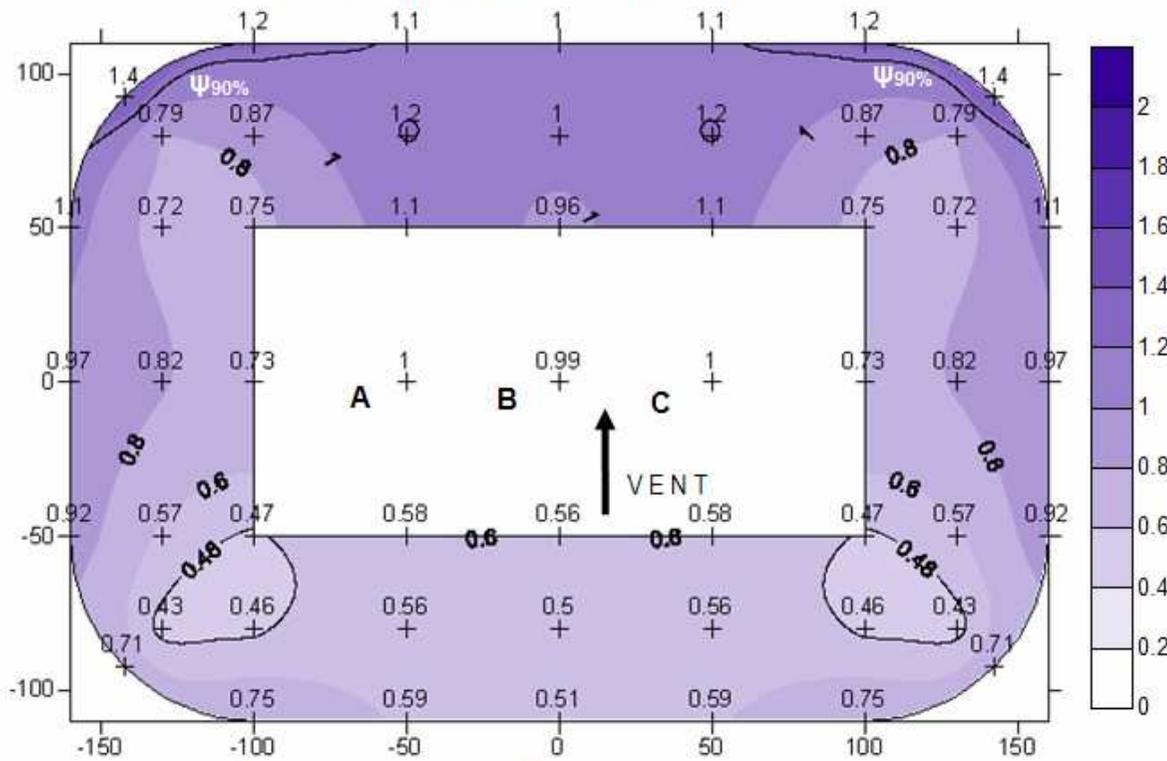
C 12 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 12 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

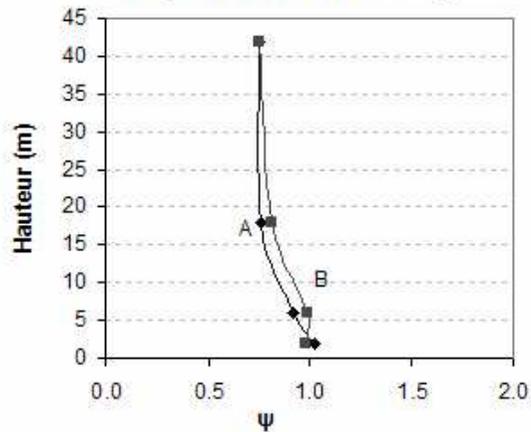


C 12 - INCIDENCE TRANSVERSALE

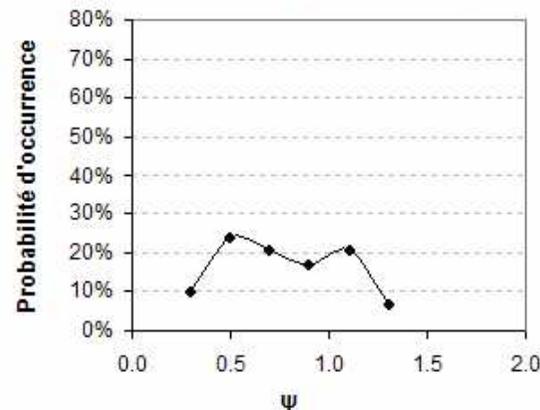


A_{totale} [m ²]:	54889
$\bar{\Psi}$:	0.75
σ :	0.24
$\Psi_{10\%}$:	0.46
$A_{\Psi_{10\%}}$ [m ²]:	3514
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}$:	6.40
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}$:	0.59
$\Psi_{90\%}$:	1.16
$A_{\Psi_{90\%}}$ [m ²]:	395
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}$:	0.72
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}$:	1.43

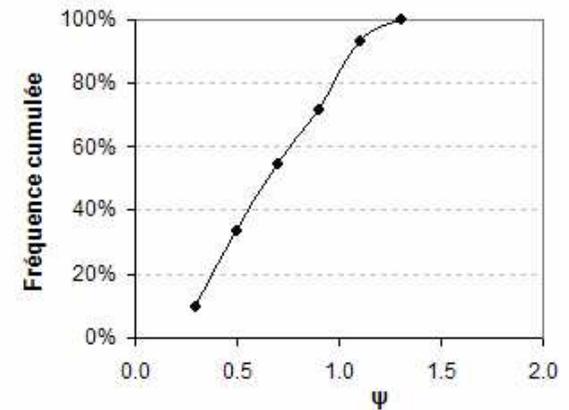
C 12 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



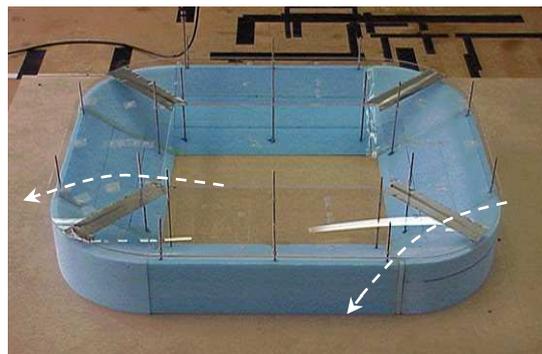
C 12 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 12 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C13 – STADE DE FOOTBALL						
COMPARER A :	C1						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.53	0.29	0.83	0.55	1.57	8.45	2.09
Longitudinale	0.55	0.29	0.83	0.53	1.51	7.57	4.11
Transversale	0.50	0.28	0.75	0.56	1.50	11.86	2.66

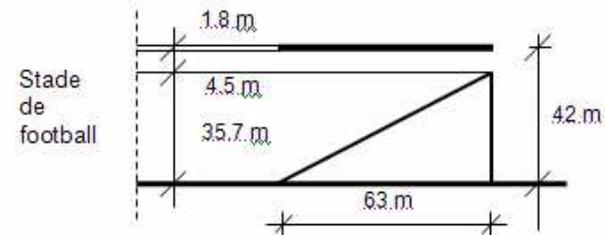
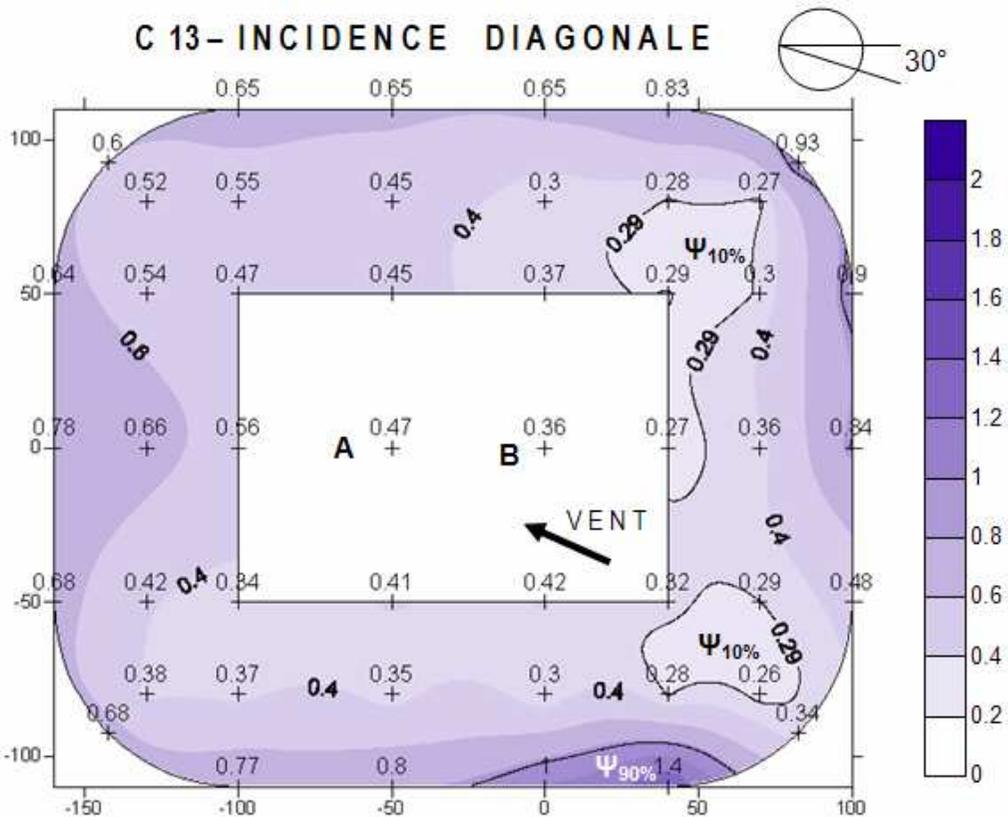


Description : Cette configuration ne comporte pas de piste d'athlétisme. En conséquence la longueur de l'aire de jeu et ainsi celle du stade sont réduites.

Résultats : La réduction de la longueur du stade n'a pas un effet important sur l'écoulement au niveau des tribunes : les phénomènes aérodynamiques observés sont identiques à ceux de la première configuration. Les cartes des iso valeurs de Ψ ont le même caractère que celles de la première configuration.

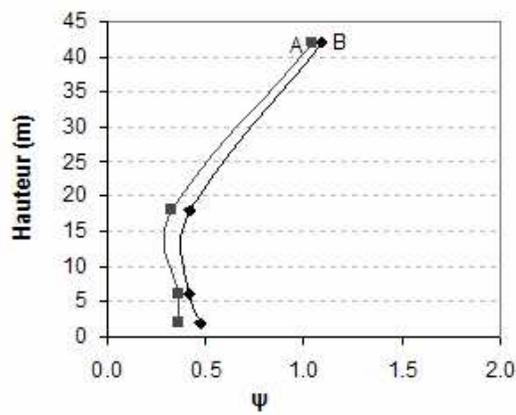
Les valeurs de $\bar{\Psi}$ sont très légèrement supérieures à celles de la première configuration (C1). Les valeurs de déciles de l'indice Ψ sont très proches de celles de la C1.

Le stade de football ne montre pas une sensibilité importante à l'incidence du vent, ce qui est indiqué par la variance modérée des valeurs de $\bar{\Psi}$, de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ avec l'incidence du vent.

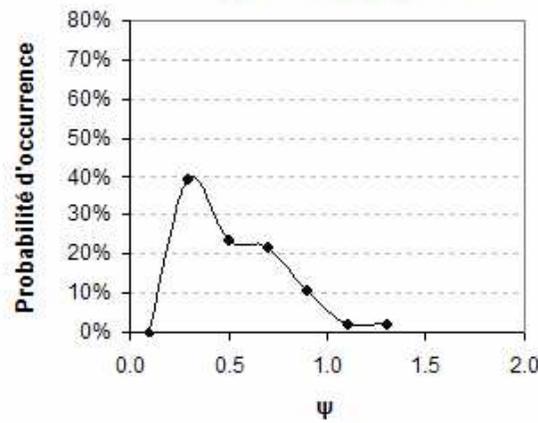


A_{totale} [m ²]:	46530
$\bar{\Psi}$:	0.53
σ :	0.25
$\Psi_{10\%}$:	0.29
$A_{\Psi_{10\%}}$ [m ²]:	3930
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}$:	8.45
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}$:	0.55
$\Psi_{90\%}$:	0.83
$A_{\Psi_{90\%}}$ [m ²]:	974
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}$:	2.09
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}$:	1.57

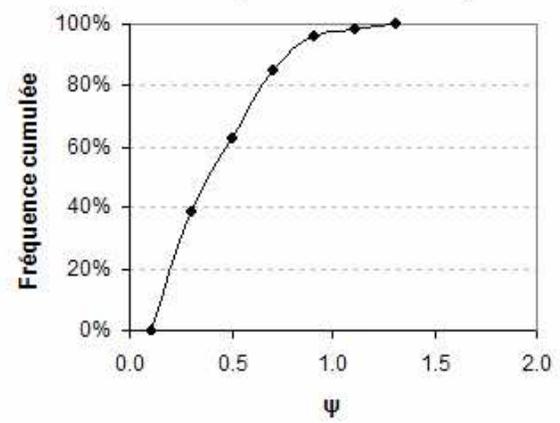
C 13 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



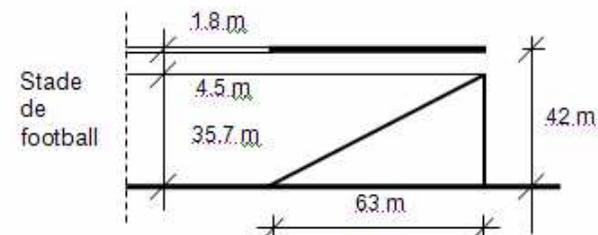
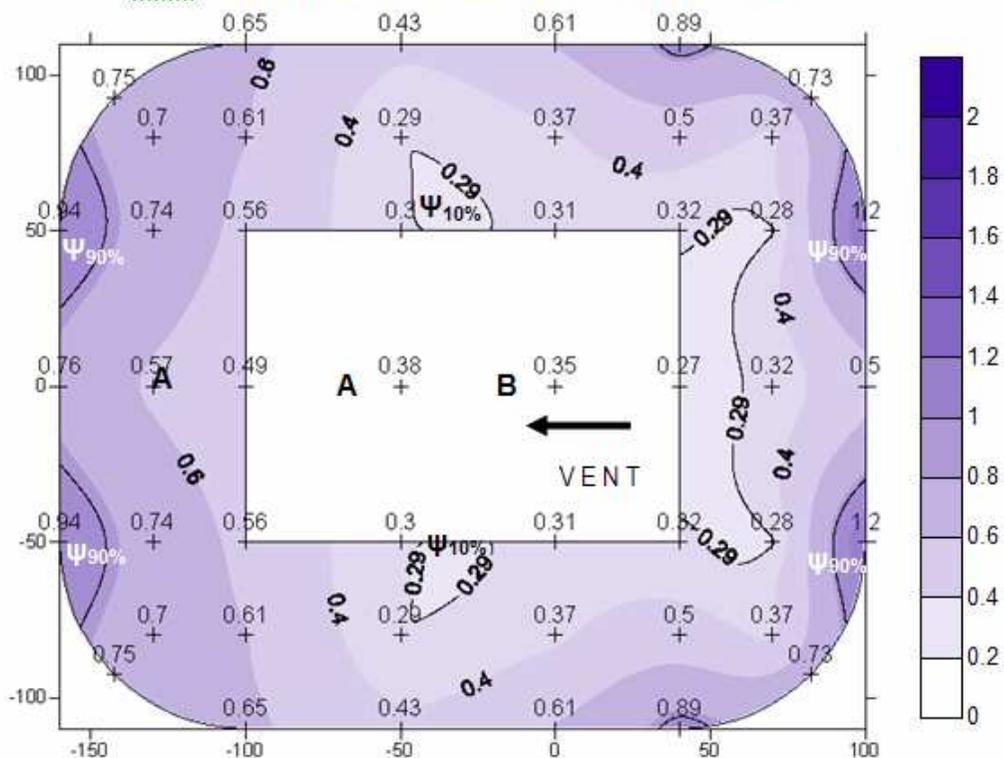
C 13 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 13 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

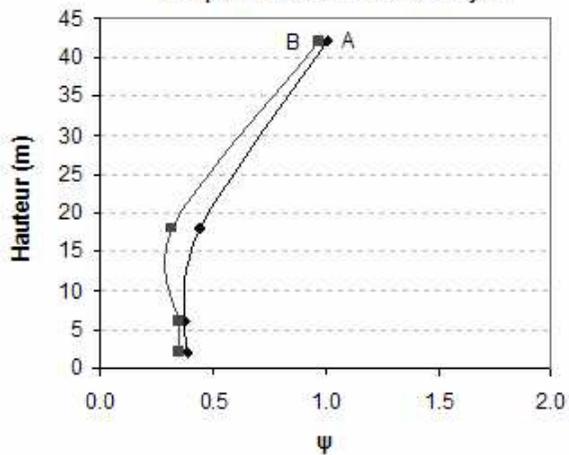


C 13 - INCIDENCE LONGITUDINALE

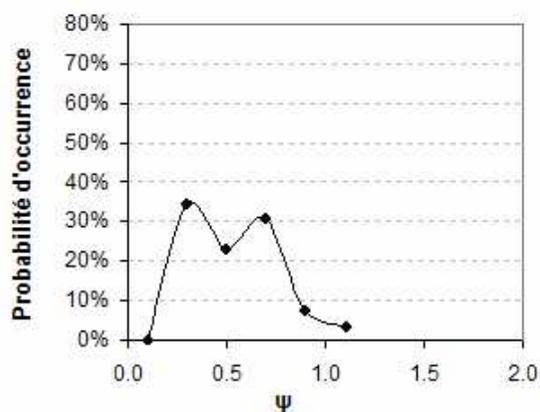


$A_{totale} [m^2]:$	46530
$\bar{\Psi}:$	0.55
$\sigma:$	0.23
$\Psi_{10\%}:$	0.29
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3522
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	7.57
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.53
$\Psi_{90\%}:$	0.83
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1913
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	4.11
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.51

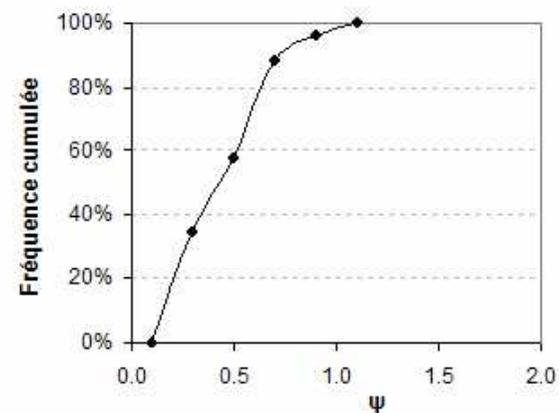
C 13 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



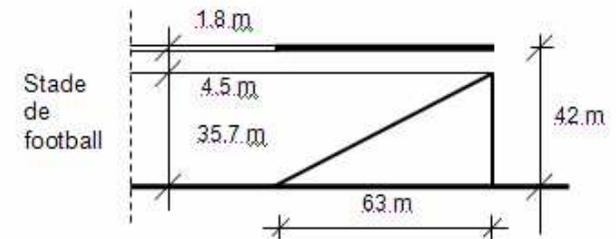
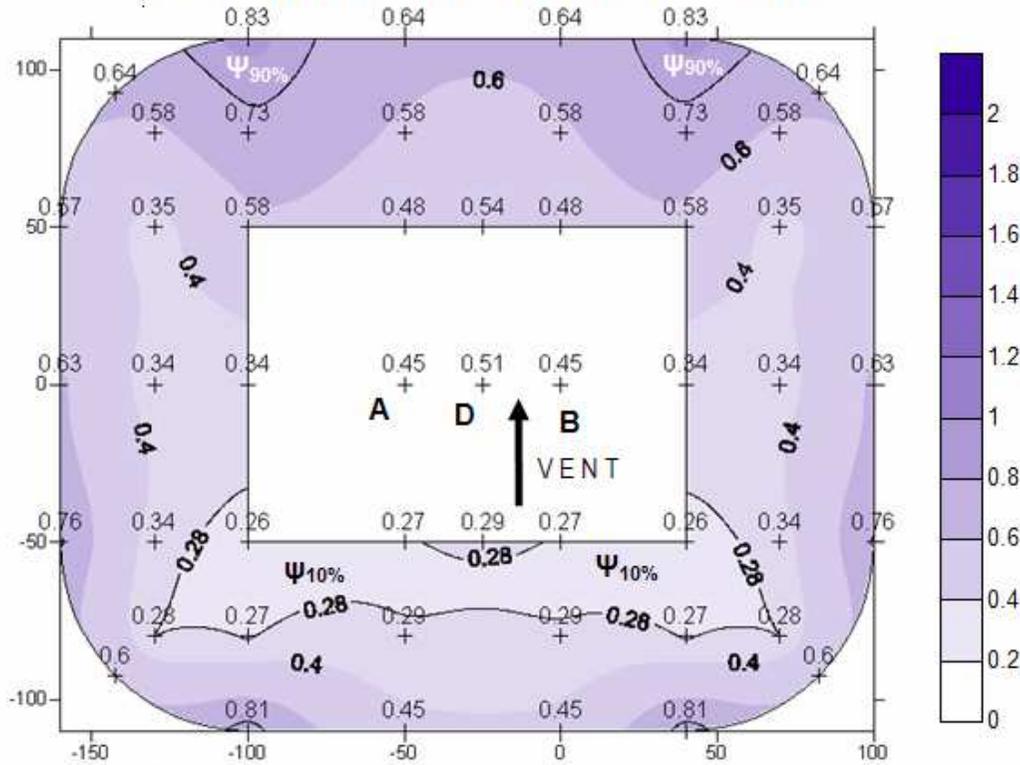
C 13 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 13 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

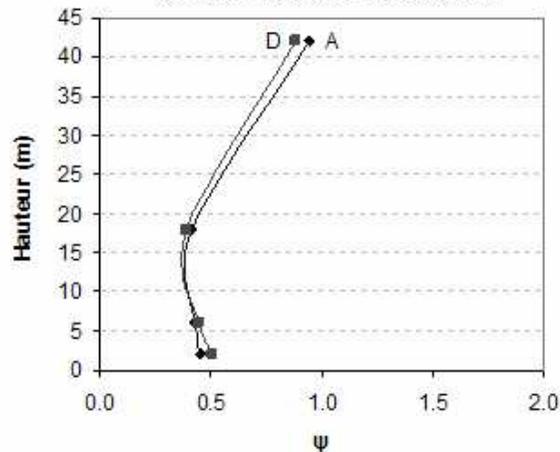


C 13 - INCIDENCE TRANSVERSALE

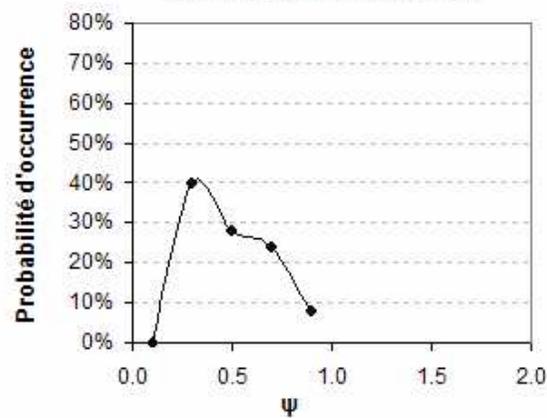


$A_{totale} [m^2]:$	46530
$\bar{\Psi}:$	0.50
$\sigma:$	0.18
$\Psi_{10\%}:$	0.28
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	5516
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	11.86
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.56
$\Psi_{90\%}:$	0.75
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1236
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	2.66
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.50

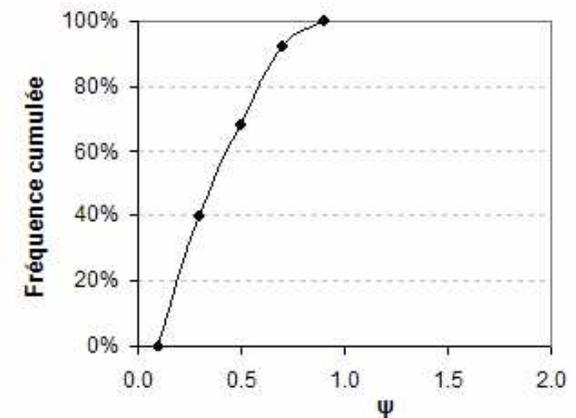
C 13 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



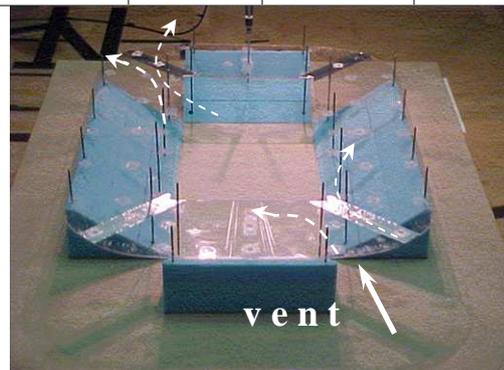
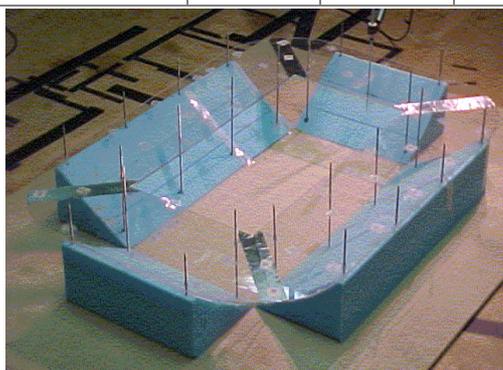
C 13 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 13 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ

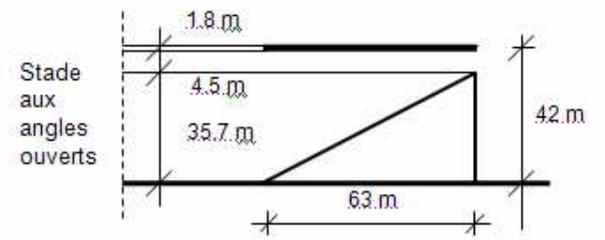
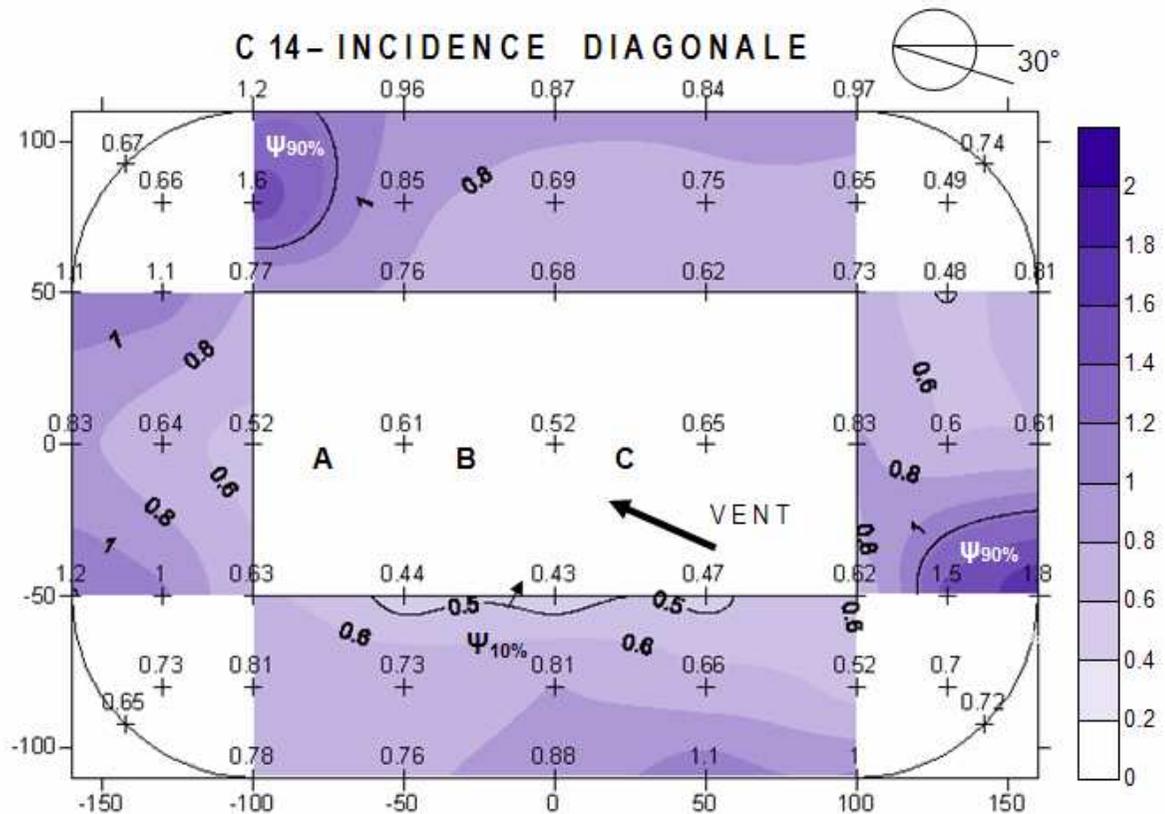


CONFIGURATION:	C14 – ANGLES OUVERTS						
COMPARER A :	C1, C17						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.83	0.50	1.16	0.60	1.40	1.27	5.28
Longitudinale	0.83	0.40	1.21	0.49	1.48	11.92	5.54
Transversale	0.75	0.39	1.28	0.52	1.71	10.94	5.47



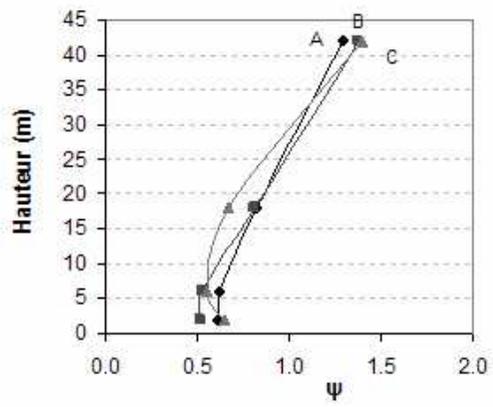
Description : Les angles de cette configuration sont ouverts. La toiture couvre les gradins en entier, y compris les angles.

Résultats : L'absence des angles induit une ventilation relativement intense pour chaque incidence. Les valeurs de $\bar{\Psi}$ sont significativement augmentées par rapport à celles de la première configuration. De plus, les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et $\Psi_{90\%}$ sont également augmentées. Les indices d'homogénéité (IH10% et IH90%) montrent une homogénéité plus importante. Les cartes d'isovaleurs indiquent qu'à l'exception de zones fortement ventilées de l'aire réduite qui se situent au niveau des tribunes latérales relatif à l'incidence du vent, la ventilation des tribunes est relativement homogène. Les zones fortement ventilées se développent à la proximité des ouvertures principalement au niveau de parties hautes des gradins au vent, où l'écoulement rentre en forme des "jets". Ce phénomène pourrait être évité par l'insertion des écrans brise-vent dans les angles. Les zones de calme se trouvent au niveau des parties basses des gradins sous le vent.

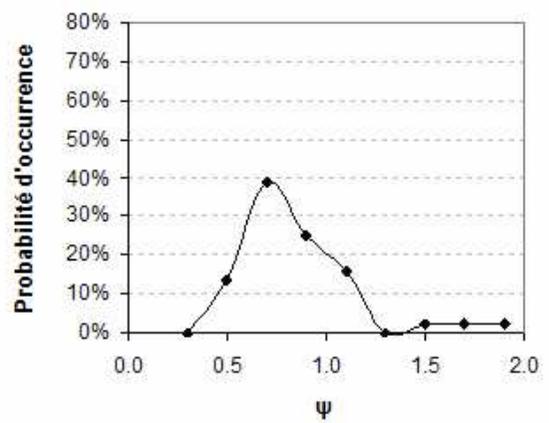


$A_{totale} [m^2]:$	41655
$\bar{\Psi}:$	0.83
$\sigma:$	0.30
$\Psi_{10\%}:$	0.50
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	528
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	1.27
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.60
$\Psi_{90\%}:$	1.16
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	2200
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	5.28
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.40

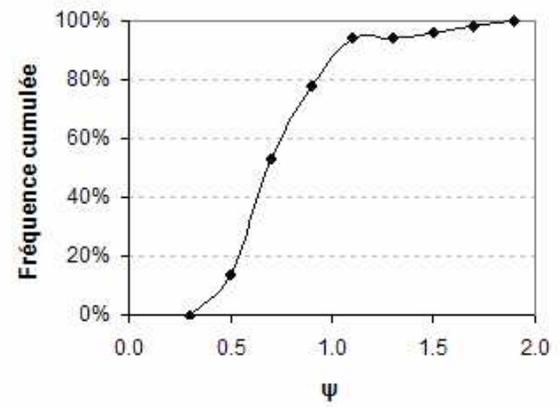
C 14 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



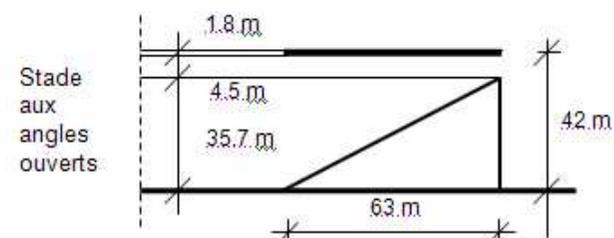
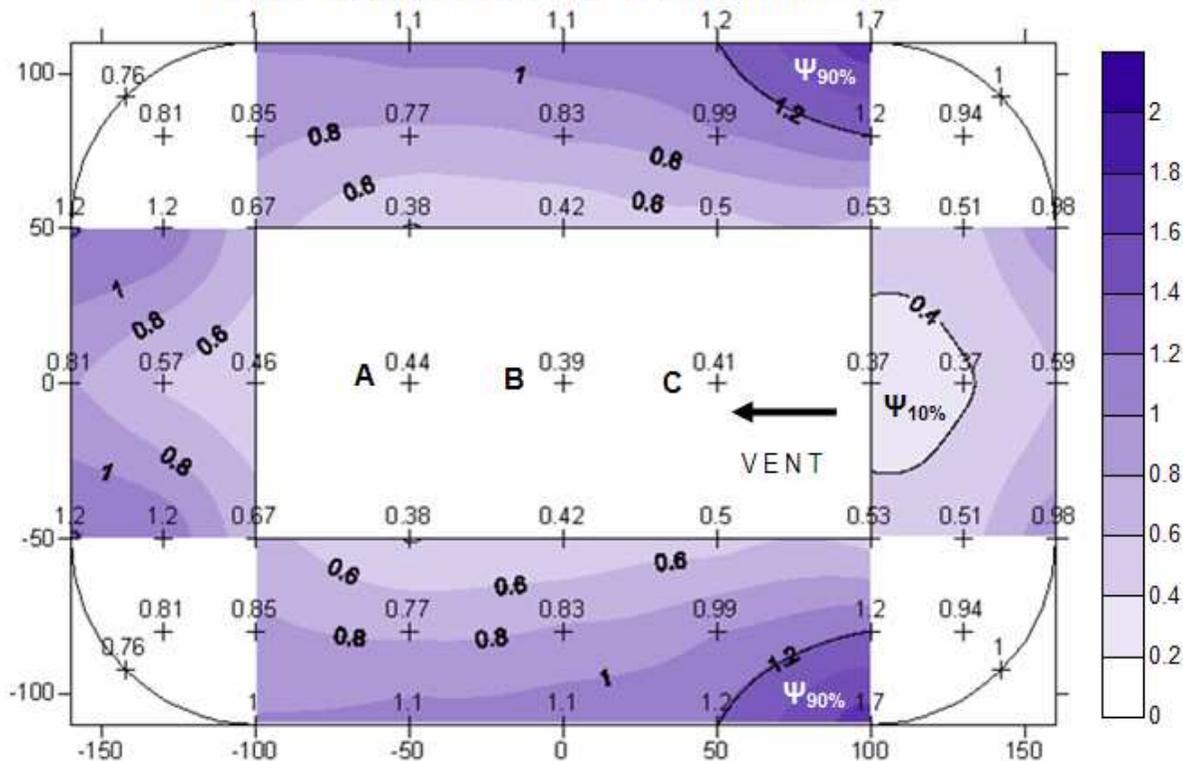
C 14 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 14 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

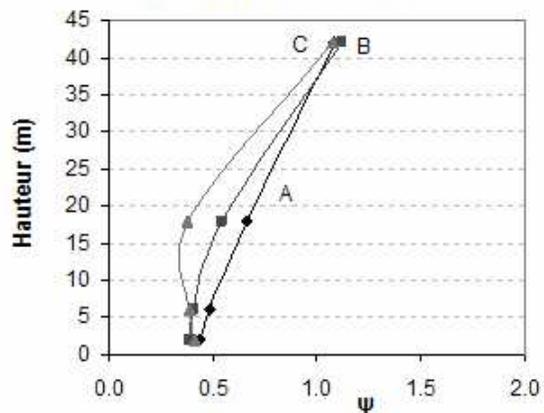


C 14 - INCIDENCE LONGITUDINALE

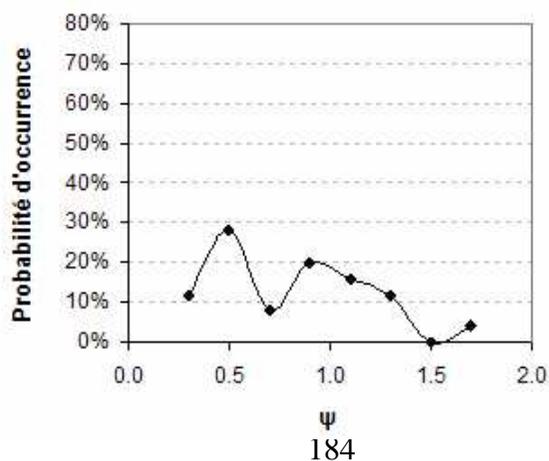


$A_{\text{totale}} [\text{m}^2]:$	41655
$\bar{\Psi}:$	0.83
$\sigma:$	0.33
$\Psi_{10\%}:$	0.40
$A_{\Psi_{10\%}} [\text{m}^2]:$	4966
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{\text{totale}}:$	11.92
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.49
$\Psi_{90\%}:$	1.21
$A_{\Psi_{90\%}} [\text{m}^2]:$	2307
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{\text{totale}}:$	5.54
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.48

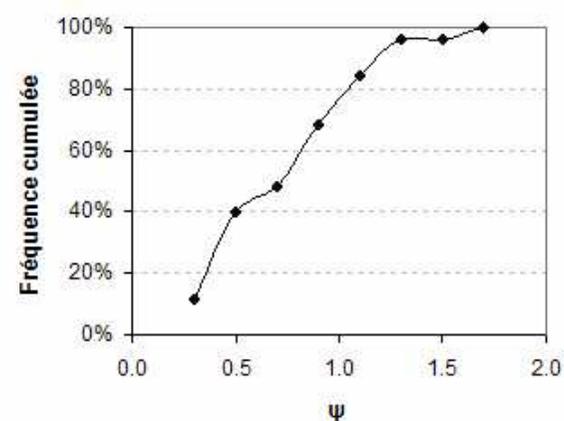
C 14 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



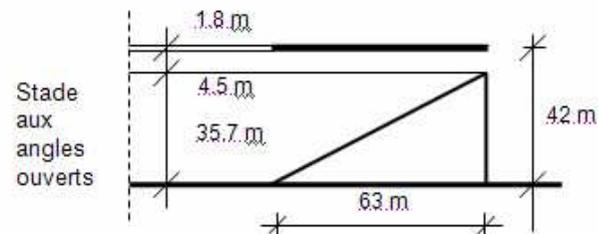
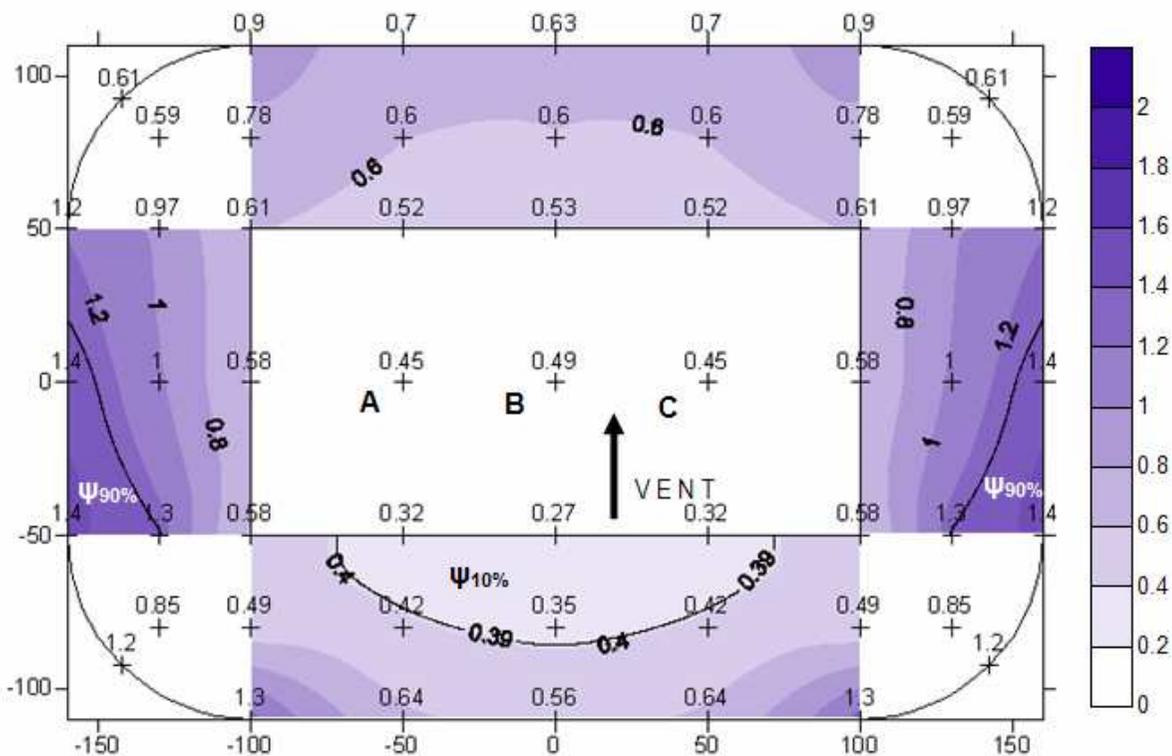
C 14 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 14 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

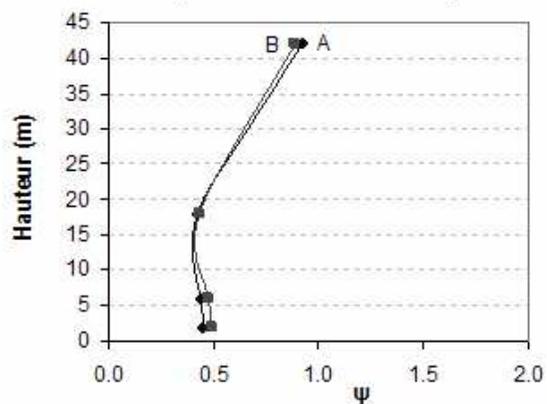


C 14 - INCIDENCE TRANSVERSALE

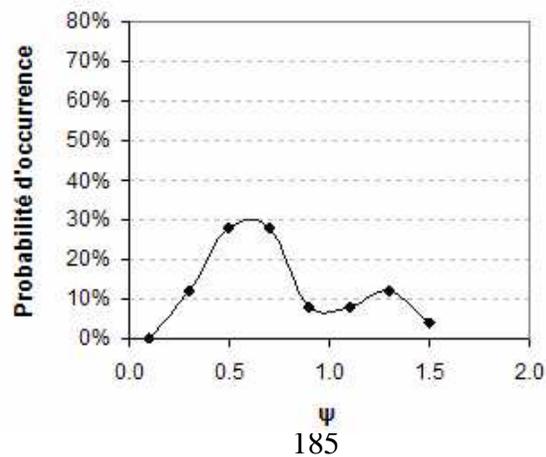


$A_{totale} [m^2]:$	41655
$\bar{\Psi}:$	0.75
$\sigma:$	0.34
$\Psi_{10\%}:$	0.39
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	4556
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	10.94
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.52
$\Psi_{90\%}:$	1.28
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	2280
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	5.47
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.71

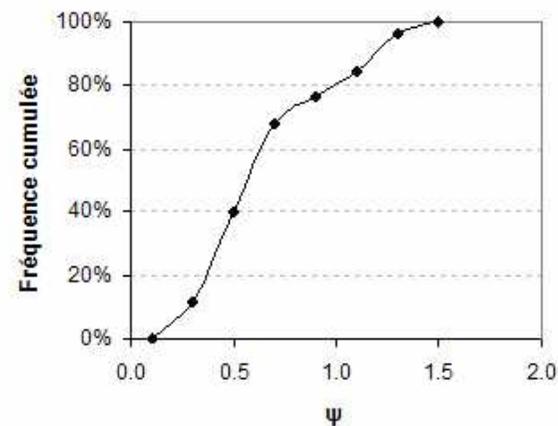
C 14 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



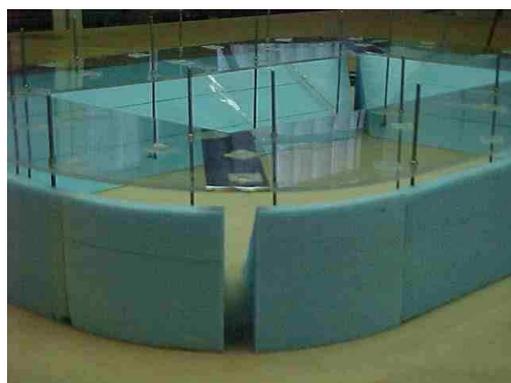
C 14 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 14 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C15 – STADE COMPORTANT DES BRECHES VERTICALES AUX ANGLES						
COMPARER A :	C1, C14, C16, C17						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.62	0.35	0.98	0.57	1.59	5.91	3.68
Longitudinale	0.65	0.36	0.89	0.55	1.37	0.74	5.89
Transversale	0.58	0.36	0.79	0.62	1.36	8.04	2.63



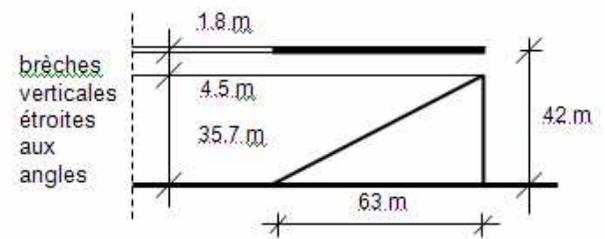
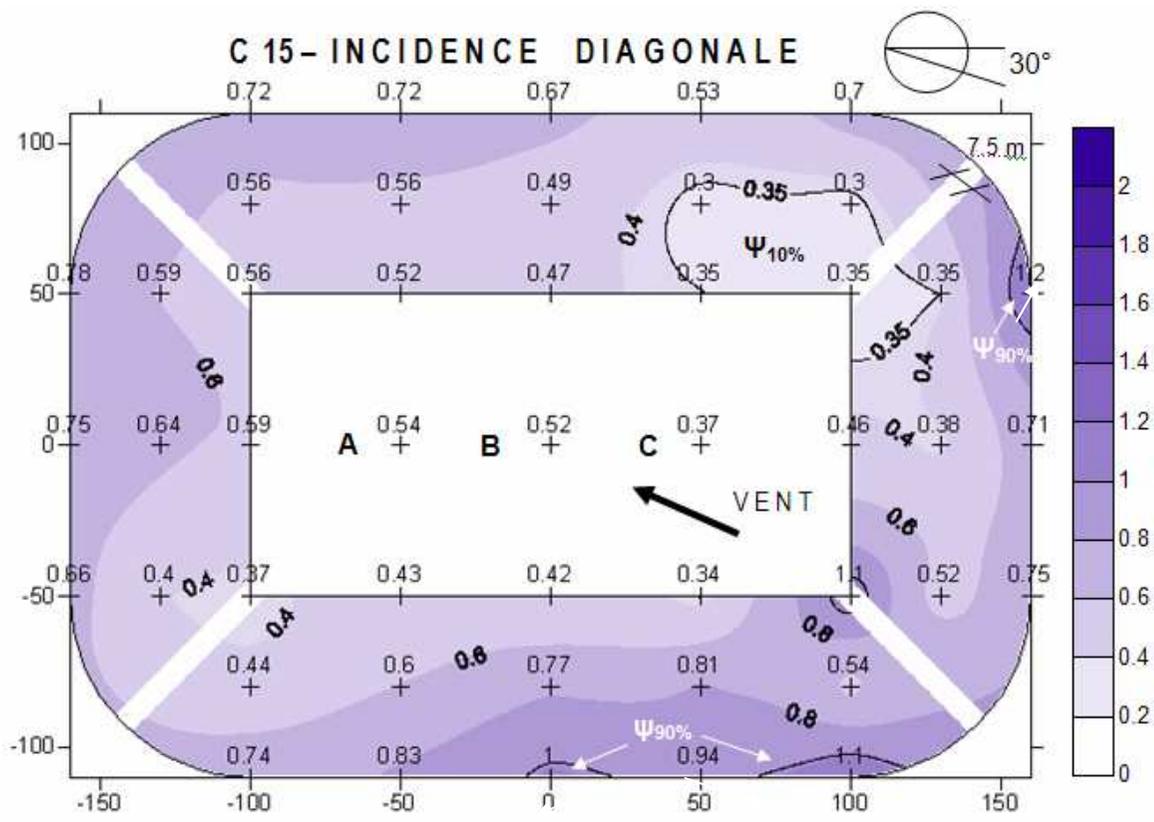
Description : Cette configuration possède des brèches verticales de largeur de 7.5 mètres, aux niveaux des angles du stade. La toiture couvre l'intégralité des gradins.

Résultats : Les brèches intensifient légèrement la ventilation par rapport à la première configuration. En revanche, les valeurs de $\bar{\Psi}$, de $\Psi_{10\%}$ et celles de $\Psi_{90\%}$ de la configuration présente sont inférieures à celles de la configuration précédente (C14). Cela indique que les brèches étroites induisent globalement une ventilation moins intense, que l'ouverture complète des angles.

L'ouverture complète des angles implique une porosité dix fois plus importante que cette configuration 15.

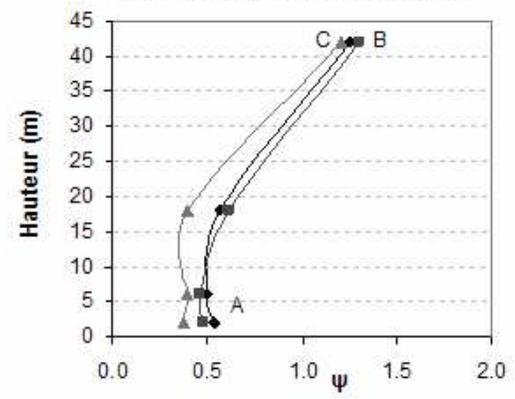
Les zones fortement ventilées se trouvent principalement au niveau des parties hautes des tribunes au vent et à la proximité des brèches. De surcroît, pour les incidences transversales et longitudinales les parties hautes des gradins sous le vent sont également concernées par une forte ventilation.

Cependant, au niveau les tribunes latérales pour l'incidence longitudinale et au niveau des tribunes sous le vent pour l'incidence diagonale l'écoulement est particulièrement homogène, ce qui est illustré par les cartes de iso valeurs de Ψ .

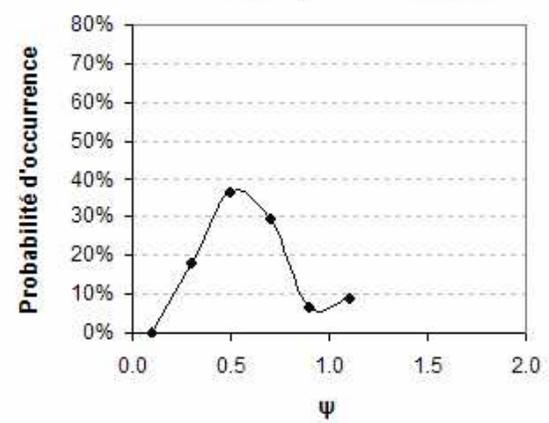


$A_{totale} [m^2]:$	52599
$\bar{\Psi}:$	0.62
$\sigma:$	0.23
$\Psi_{10\%}:$	0.35
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3107
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	5.91
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.57
$\Psi_{90\%}:$	0.98
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1935
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	3.68
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.59

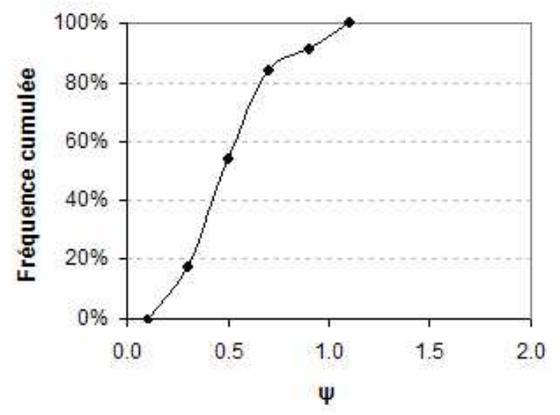
C 15 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



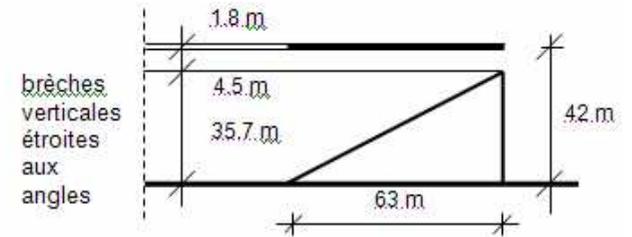
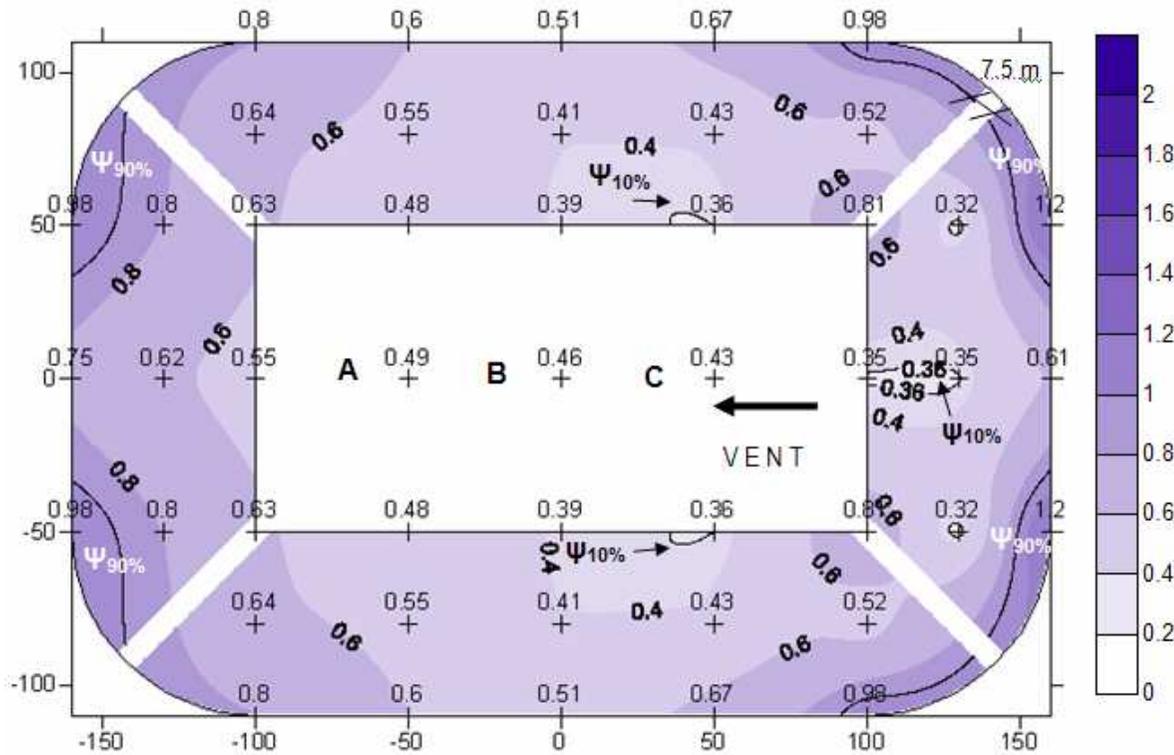
C 15 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 15 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

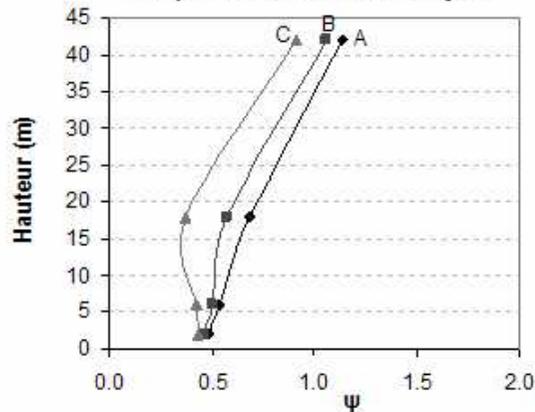


C 15- INCIDENCE LONGITUDINALE

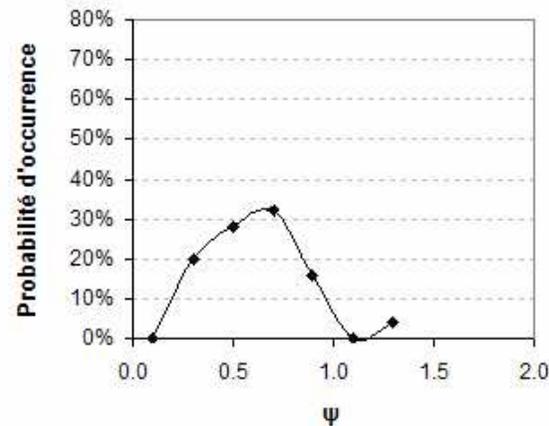


$A_{totale} [m^2]:$	52599
$\bar{\Psi}:$	0.65
$\sigma:$	0.23
$\Psi_{10\%}:$	0.36
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	387
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	0.74
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.55
$\Psi_{90\%}:$	0.89
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	3098
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	5.89
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.37

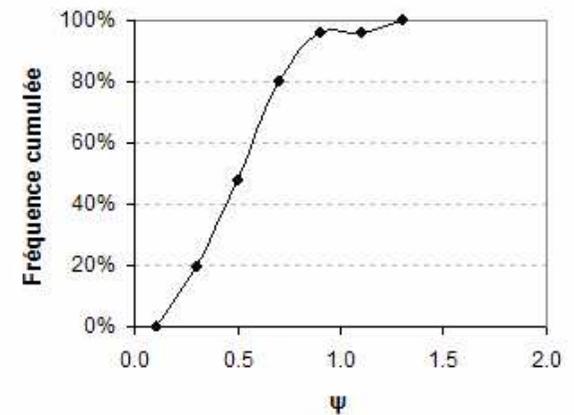
C 15 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



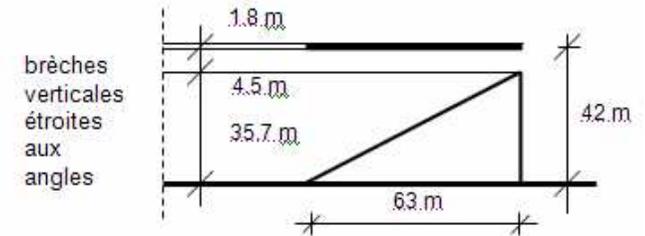
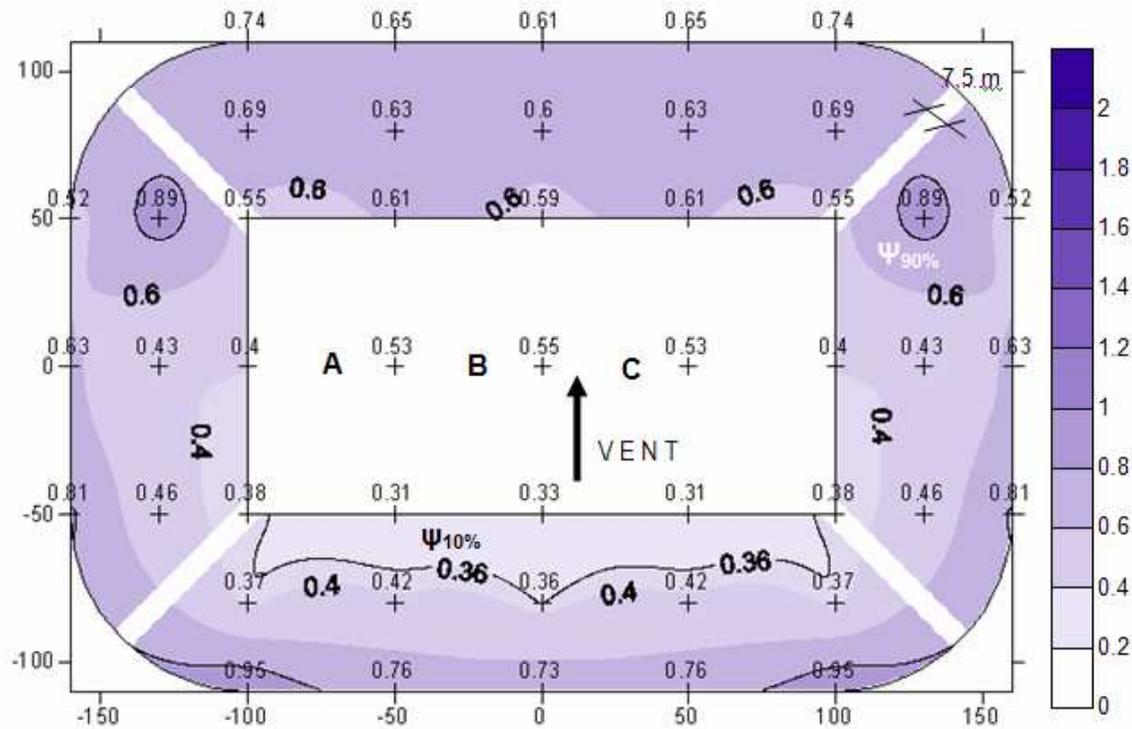
C 15 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 15 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

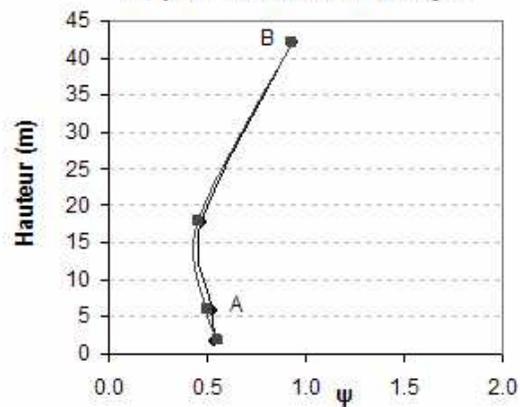


C 15 - INCIDENCE TRANSVERSALE

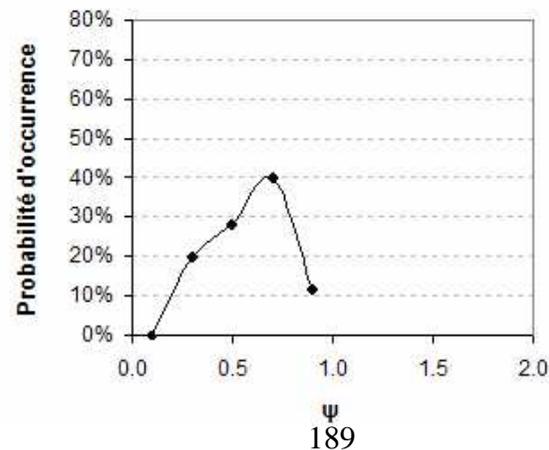


$A_{totale} [m^2]:$	52599
$\bar{\Psi}:$	0.58
$\sigma:$	0.18
$\Psi_{10\%}:$	0.36
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	4228
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	8.04
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.62
$\Psi_{90\%}:$	0.79
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1385
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	2.63
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.36

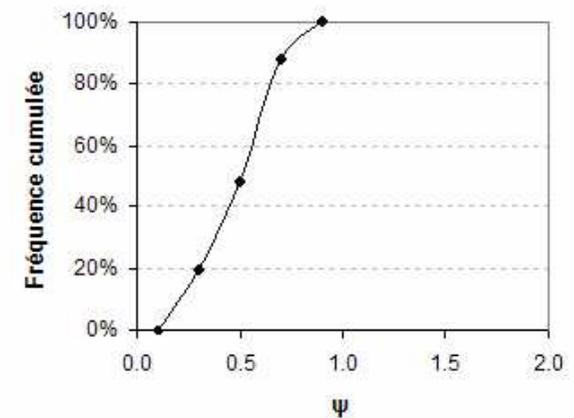
C 15 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



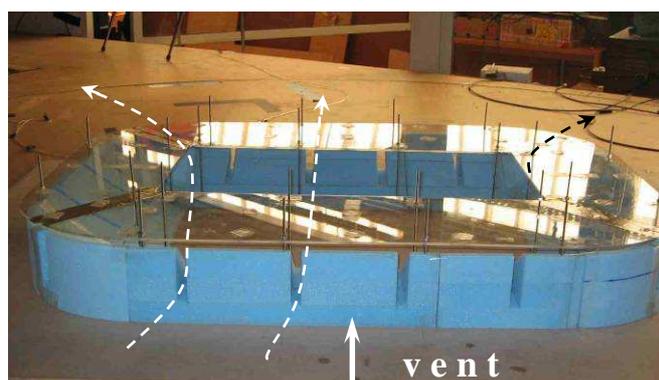
C 15 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 15 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C16 – FACADE DIVISEE PAR DES BRECHES VERTICALES UNIFORMEMENT REPARTIES						
COMPARER A :	C1, C8, C14, C15, C17						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.56	0.30	0.93	0.54	1.68	7.59	2.61
Longitudinale	0.53	0.30	0.82	0.57	1.55	10.97	5.46
Transversale	0.48	0.29	0.68	0.57	1.42	4.03	3.36



Description : Cette configuration comporte des gradins de deux sortes :

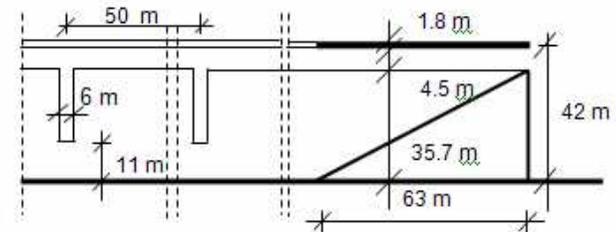
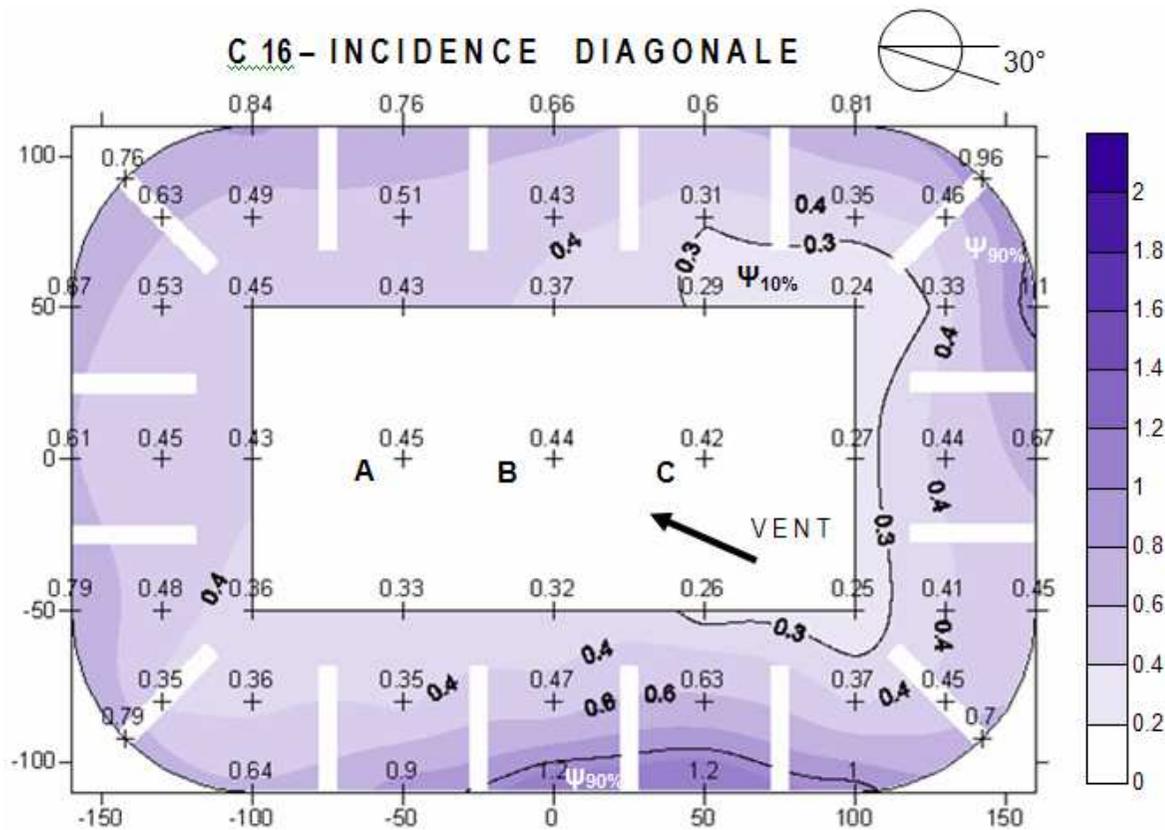
- les gradins inférieurs sont continus;
- les gradins supérieurs sont divisés par des brèches verticales uniformément réparties de largeur 6 mètres.

La toiture horizontale couvre l'intégralité des gradins.

Résultats : Les brèches augmentent légèrement la ventilation par rapport à la première configuration.

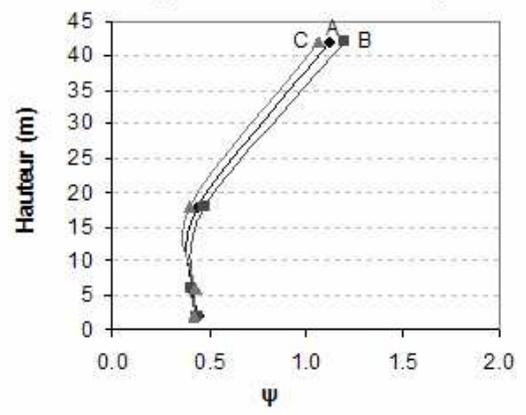
Cependant, les valeurs de $\bar{\Psi}$, de $\Psi_{10\%}$ et celles de $\Psi_{90\%}$ de cette configuration sont inférieures à celles de la configuration précédente (C15). Cela indique que les brèches verticales, étroites localisées aux angles, telles que décrites par C15, induisent globalement une ventilation forte, que des brèches verticales uniformément réparties (C16), bien que le taux de porosité de C16 est quatre fois supérieure à celui de la C15.

Les zones fortement ventilées se trouvent au niveau des parties hautes des tribunes en raison de la présence des brèches. Les zones de calme se situent au niveau des parties basses des gradins continus sous le vent. L'écoulement est homogène, surtout pour les incidences longitudinale et transversale, ce qui est indiqué d'une part par la carte d'iso valeurs de Ψ , et d'autre part par la faible dispersion de la population des données.

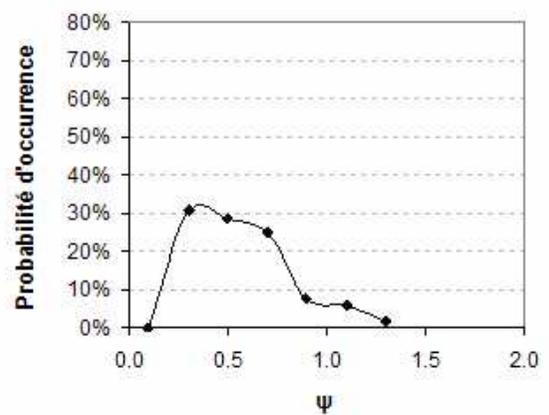


$A_{totale} [m^2]:$	49874
$\bar{\Psi}:$	0.56
$\sigma:$	0.24
$\Psi_{10\%}:$	0.30
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3786
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	7.59
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.54
$\Psi_{90\%}:$	0.93
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1300
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	2.61
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.68

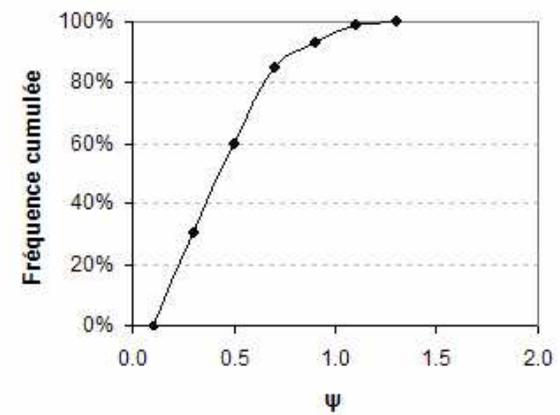
C 16 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



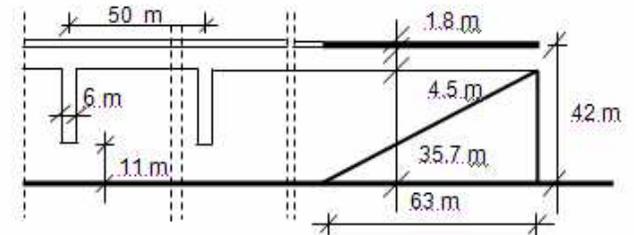
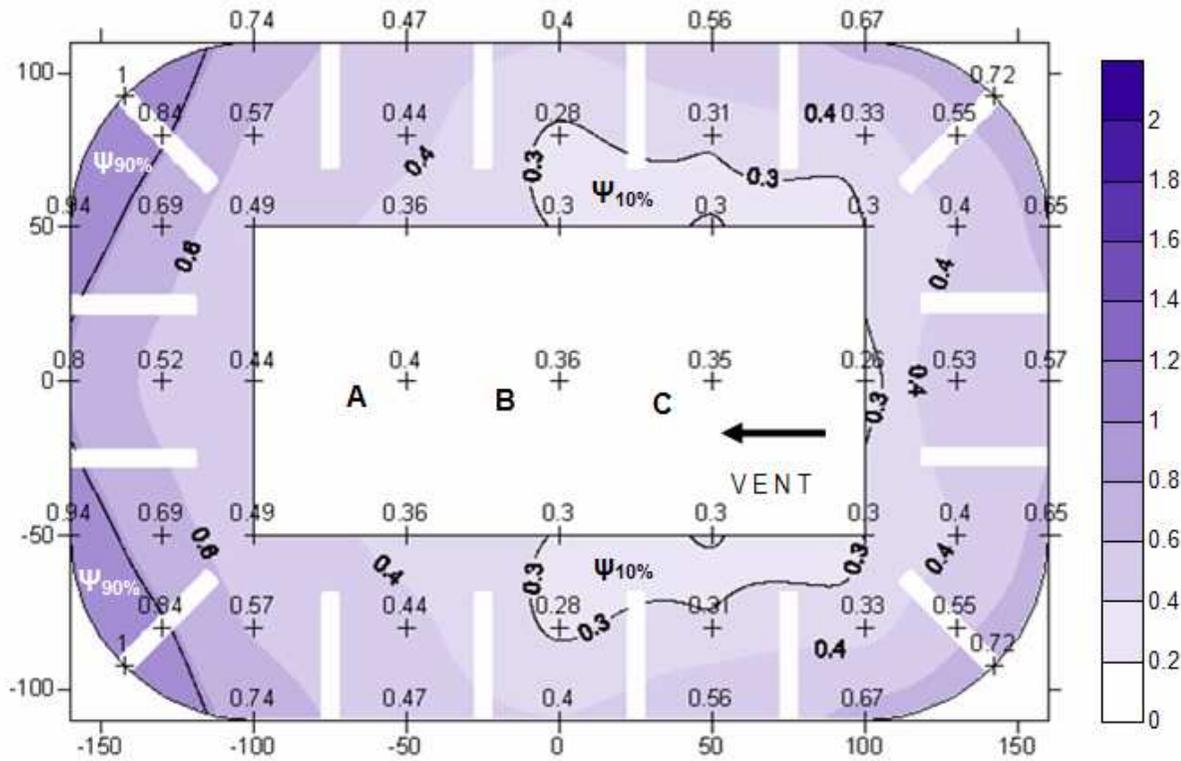
C 16 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 16 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

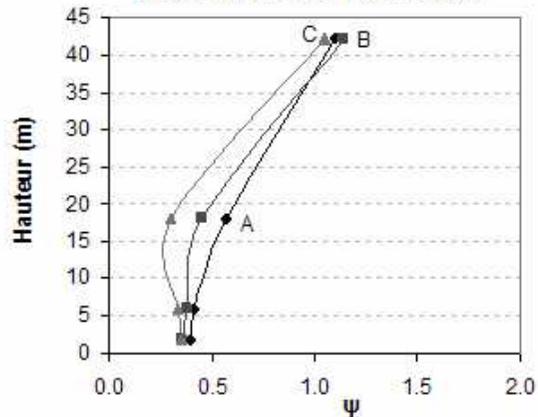


C 16 - INCIDENCE LONGITUDINALE

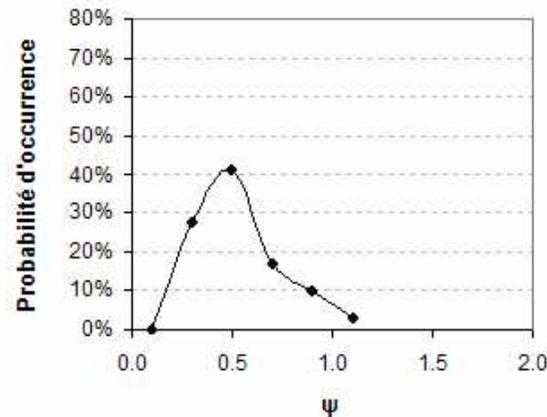


$A_{totale} [m^2]:$	49874
$\bar{\Psi}:$	0.53
$\sigma:$	0.20
$\Psi_{10\%}:$	0.30
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	5473
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	10.97
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.57
$\Psi_{90\%}:$	0.82
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	2721
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	5.46
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.55

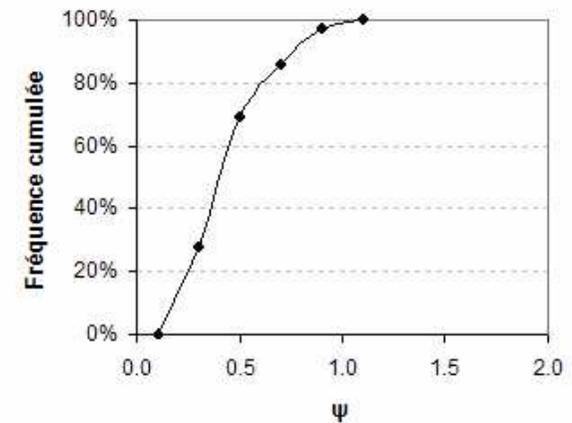
C 16 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



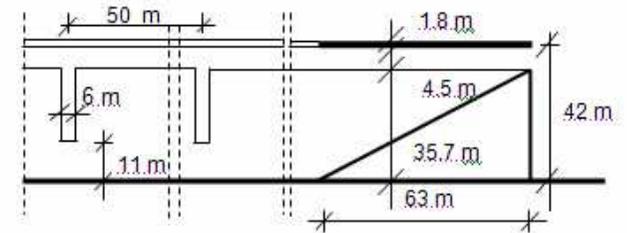
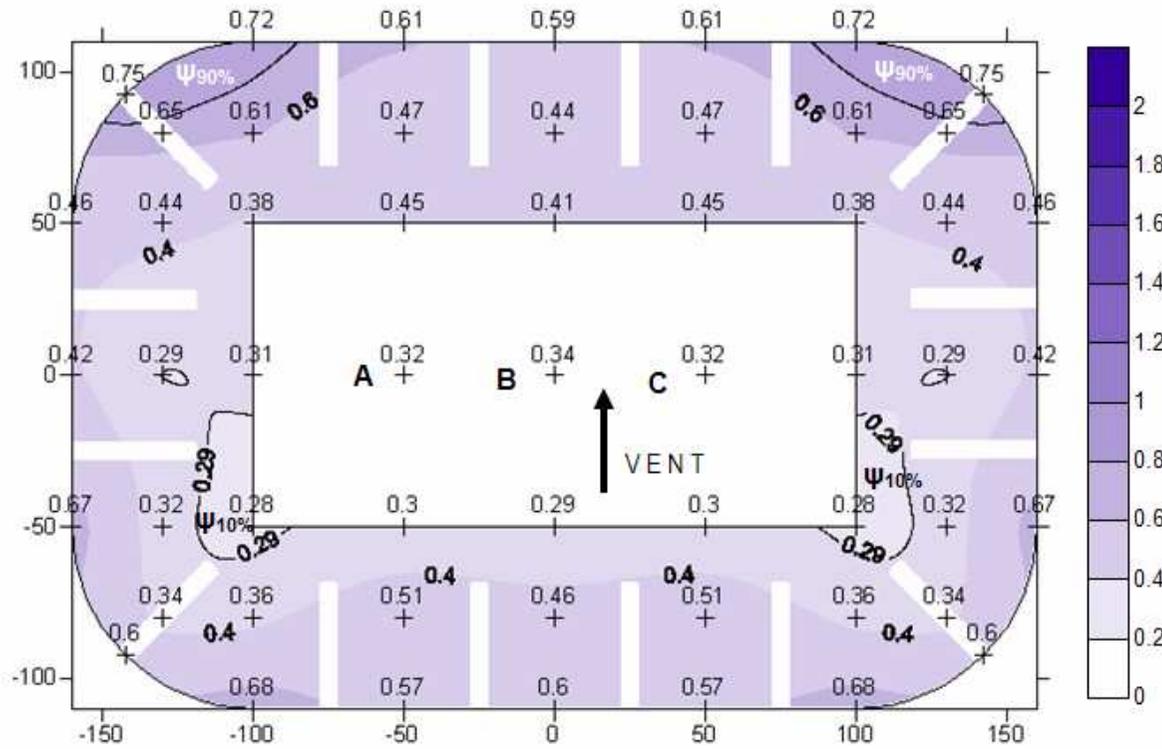
C 16 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 16 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

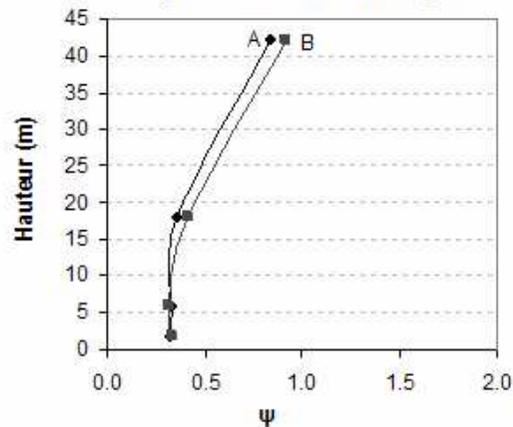


C 16 - INCIDENCE TRANSVERSALE

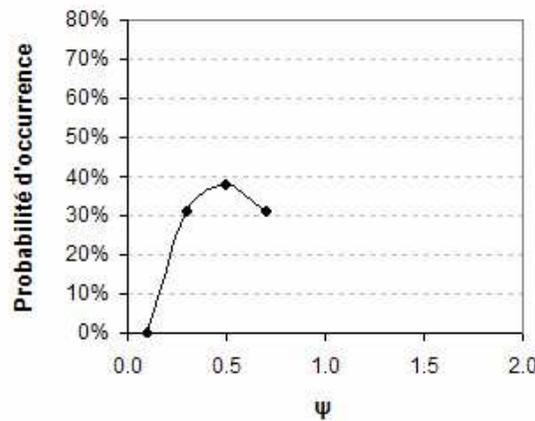


$A_{totale} [m^2]:$	49874
$\bar{\Psi}:$	0.48
$\sigma:$	0.14
$\Psi_{10\%}:$	0.29
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	2011
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	4.03
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.57
$\Psi_{90\%}:$	0.68
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	1677
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	3.36
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.42

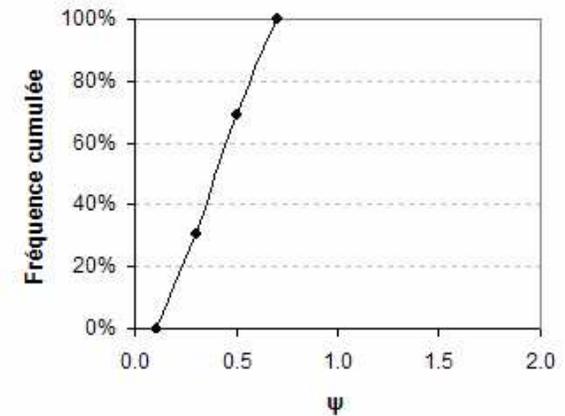
C 16 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



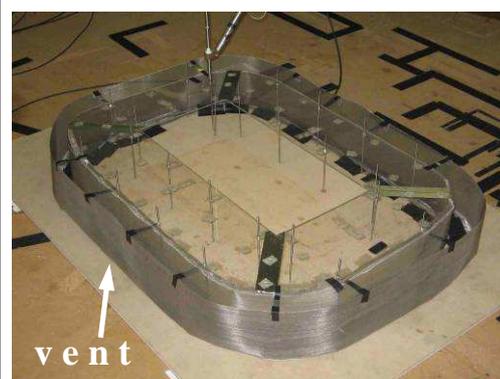
C 16 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 16 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C17 – CAS REFERENCE "THEORIQUE"						
COMPARER A :	C1						
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%	$A\Psi_{10\%}/A_T$	$A\Psi_{90\%}/A_T$
Diagonale	0.29	0.16	0.42	0.55	1.45	11.70	6.48
Longitudinale	0.27	0.16	0.39	0.59	1.44	4.80	4.38
Transversale	0.27	0.15	0.40	0.56	1.48	6.68	6.21



Description : Cette configuration est le **cas référence théorique** et ne comporte pas des tribunes "réelles" mais "virtuelles". Elle se compose d'une façade de deux grilles métalliques superposées de porosité de 50% et d'une toiture horizontale qui couvre l'intégralité des gradins.

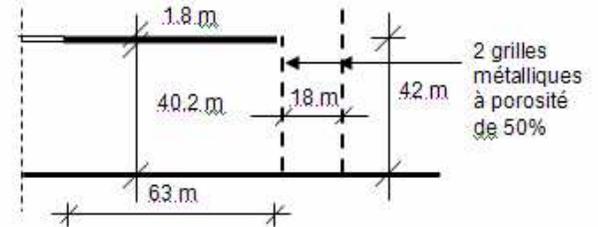
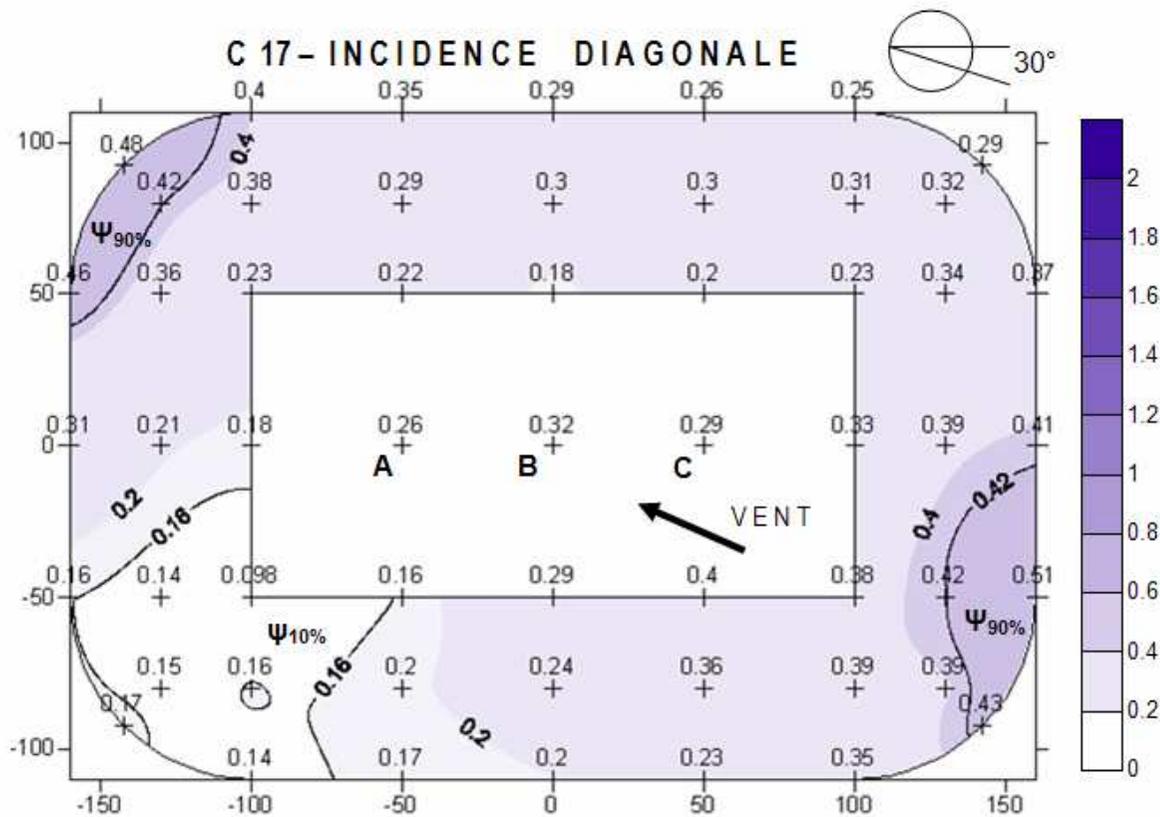
L'emplacement des points de mesure est identique à celui des configurations précédentes (même hauteur, même en l'absence des tribunes).

Résultats : Le **cas référence théorique** ne présente pratiquement pas de sensibilité à l'incidence : les valeurs de $\bar{\Psi}$ varient entre 0.27 et 29, celles de $\Psi_{90\%}$ entre 0.39 et 0.42. Le vent d'incidence diagonale induit des accélérations au niveau des angles le long de l'axe diagonal. Une zone de calme se crée à l'angle sous le vent. Le vent d'incidence longitudinale génère une accélération principalement au niveau des parties hautes des tribunes (virtuelles) au vent et crée des zones de calme au niveau des parties basses des tribunes latérales proche des angles. Le vent d'incidence transversale crée des accélérations au niveau des tribunes au vent. La zone la moins ventilée se trouve au niveau de la partie basse des tribunes sous le vent. **Les résultats mettent en évidence que même par une configuration idéalisée il n'est pas possible de créer un écoulement parfaitement homogène.**

Les valeurs de $\bar{\Psi}$ ont diminuées d'environ 45% par rapport à la première configuration (C1). Les écrans poreux empêchent la création des zones fortement dépressionnaires au sein du stade, en conséquence les phénomènes de recirculation du flux sont amoindris.

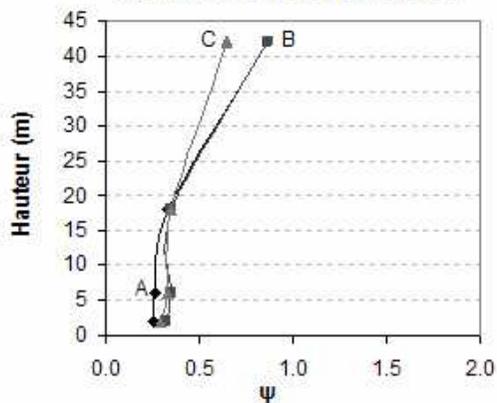
Les écart-types sont réduits de 50% par rapport à la première configuration (C1), ce qui traduit la régularisation de l'écoulement. Cependant, les valeurs des indices d'homogénéité n'indiquent pas une grande amélioration : les valeurs de IH 10% sont autour de 0.55, et celles de IH 90% valent environ 1.45.

Note : les indices IH 10% et IH 90% perdent sa pertinence pour les faibles valeurs de Ψ , il est alors intéressant de regarder les écarts absolues des valeurs.

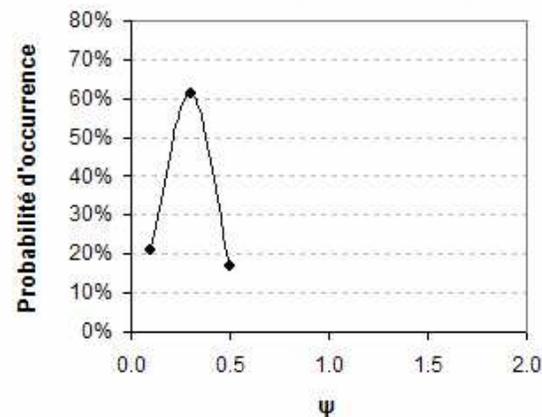


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.29
$\sigma:$	0.10
$\Psi_{10\%}:$	0.16
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	6423
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	11.70
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.55
$\Psi_{90\%}:$	0.42
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	3555
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	6.48
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.45

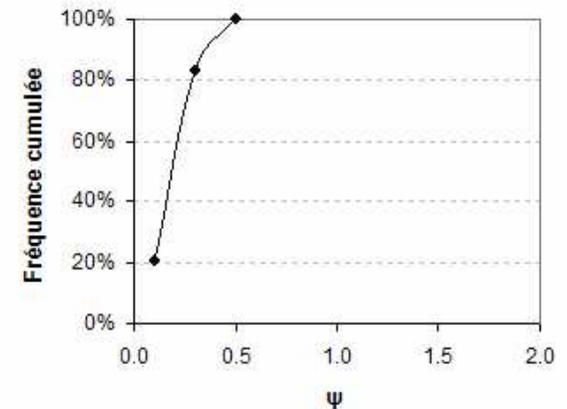
C 17 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



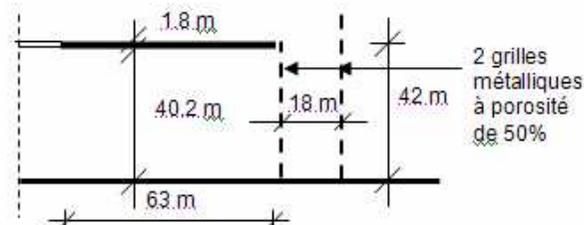
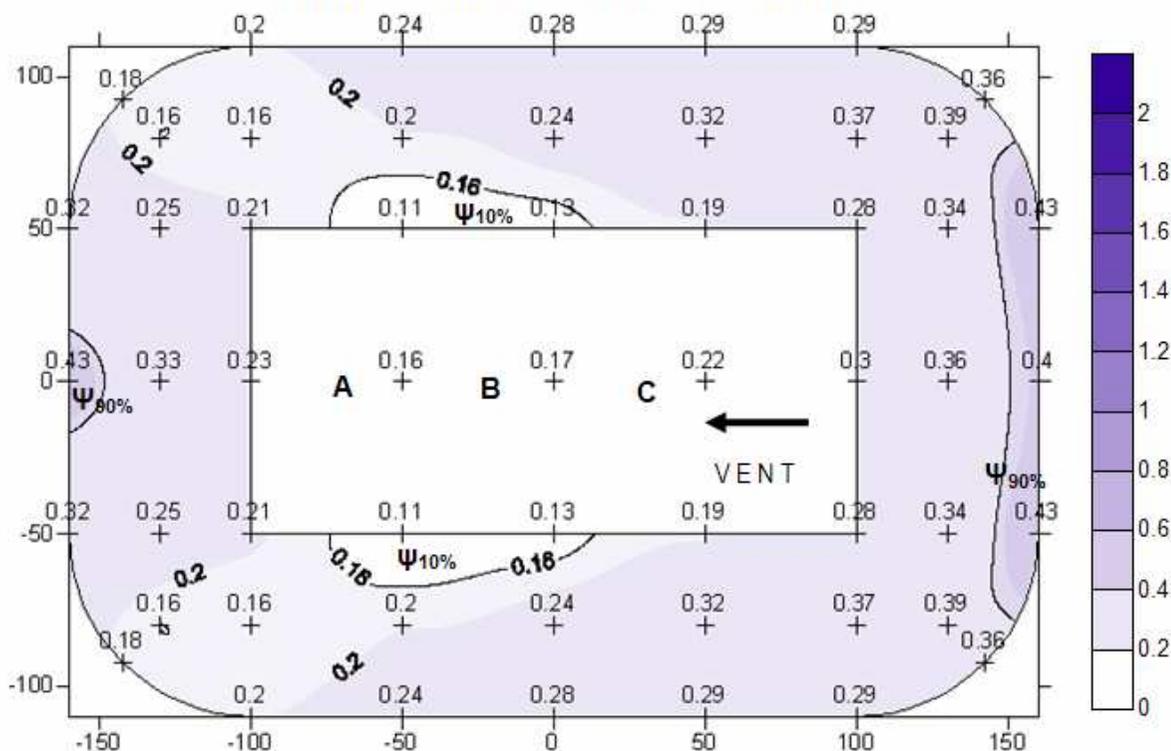
C 17 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 17 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

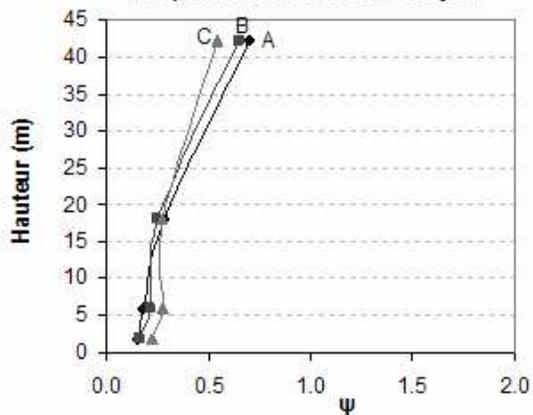


C 17 - INCIDENCE LONGITUDINALE

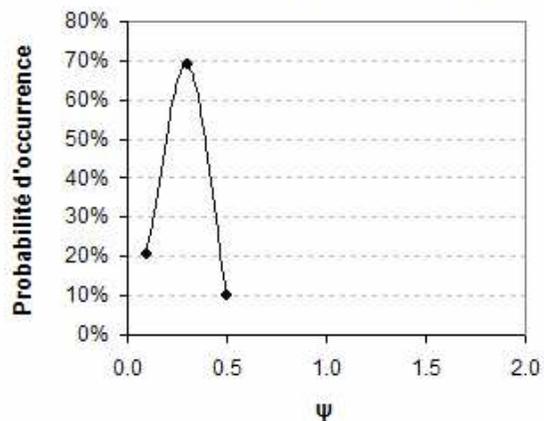


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.27
$\sigma:$	0.09
$\Psi_{10\%}:$	0.16
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	2637
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	4.80
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.59
$\Psi_{90\%}:$	0.39
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	2404
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	4.38
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.44

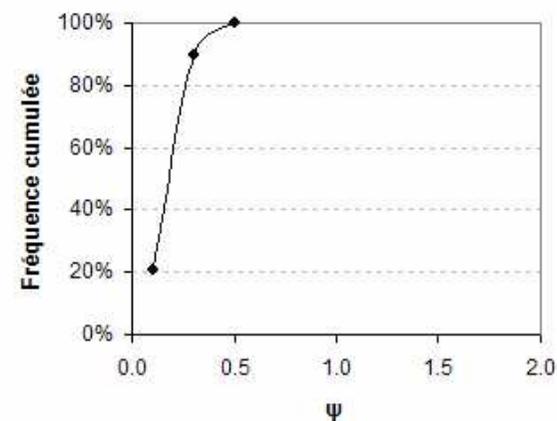
C 17 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



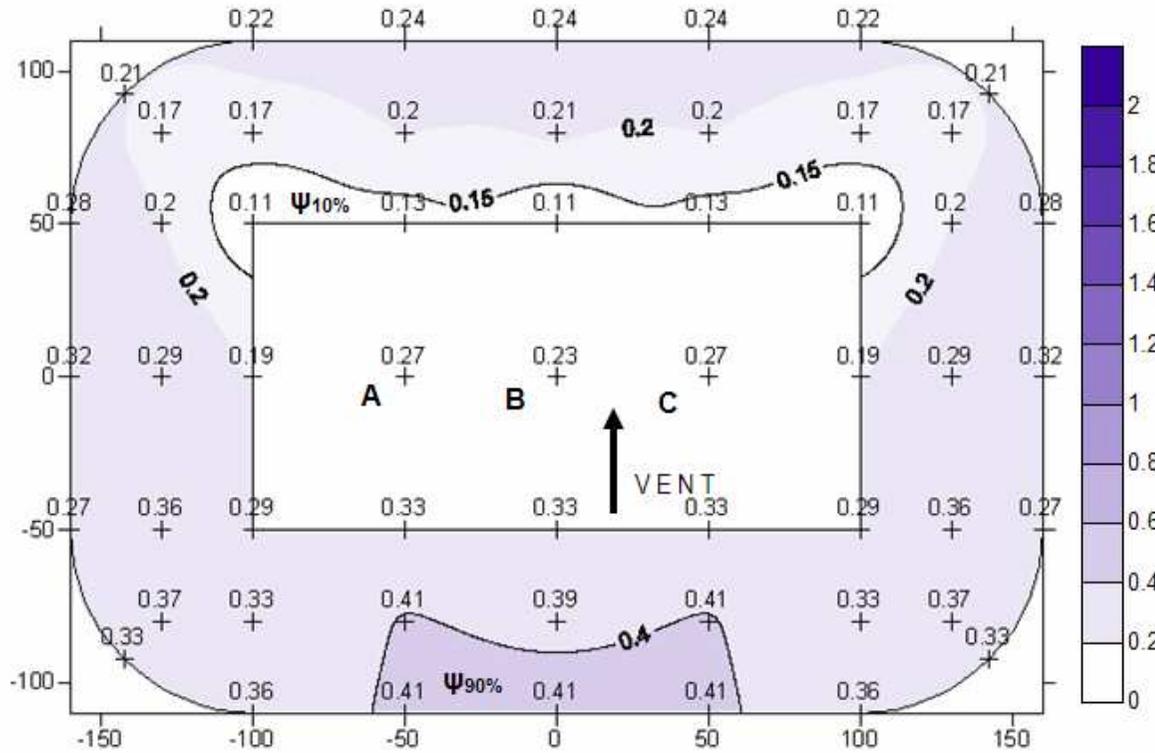
C 17 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



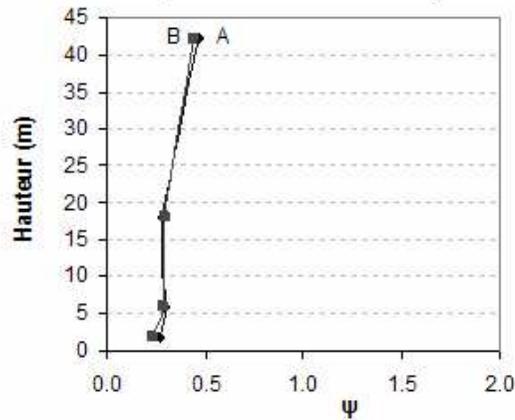
C 17 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ



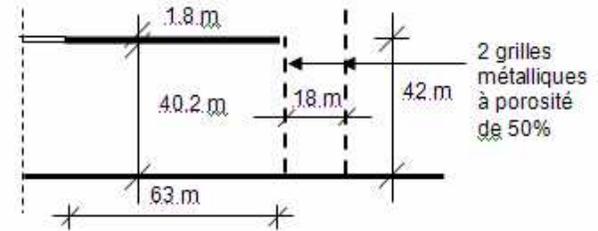
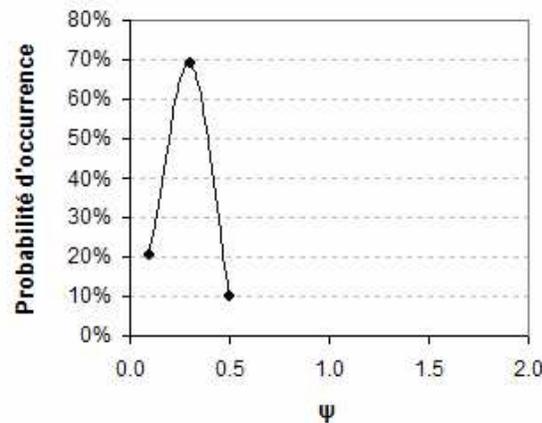
C 17 - INCIDENCE TRANSVERSALE



C 17 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu

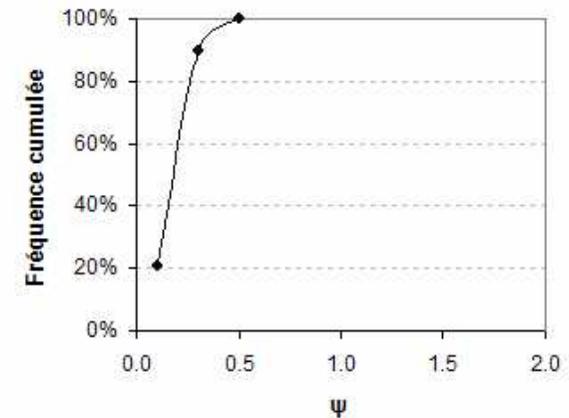


C 17 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ

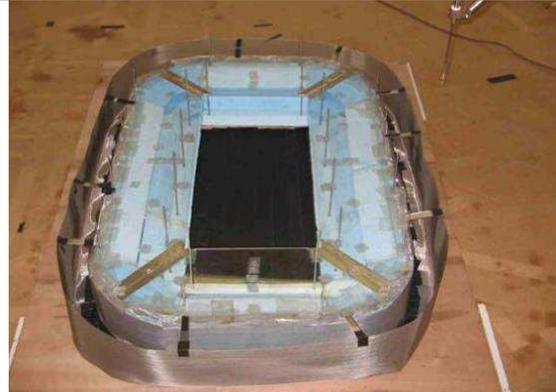


$A_{totale} [m^2]:$	54889
$\bar{\Psi}:$	0.27
$\sigma:$	0.09
$\Psi_{10\%}:$	0.15
$A_{\Psi_{10\%}} [m^2]:$	3364
$100 \cdot A_{\Psi_{10\%}} / A_{totale}:$	6.68
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}:$	0.56
$100 \cdot \Psi_{10\%} \cdot A_{\Psi_{10\%}} / \bar{\Psi} \cdot A_{totale}:$	3.71
$A_{\Psi_{90\%}} [m^2]:$	6.21
$100 \cdot A_{\Psi_{90\%}} / A_{totale}:$	4.38
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}:$	1.48

C 17 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



CONFIGURATION:	C18 – UNE VARIANTE DE C10 : FAÇADE COUVERTE PAR 2 GRILLES ELOIGNEES SUPERPOSEES				
COMPARER A :	C1, C10, C17, C19				
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%
Diagonale	0.37	0.17	0.61	0.46	1.65
Longitudinale	0.40	0.21	0.60	0.43	1.57
Transversale	0.33	0.20	0.65	0.61	1.97



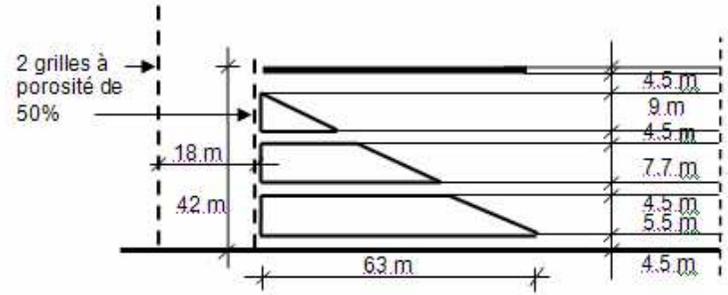
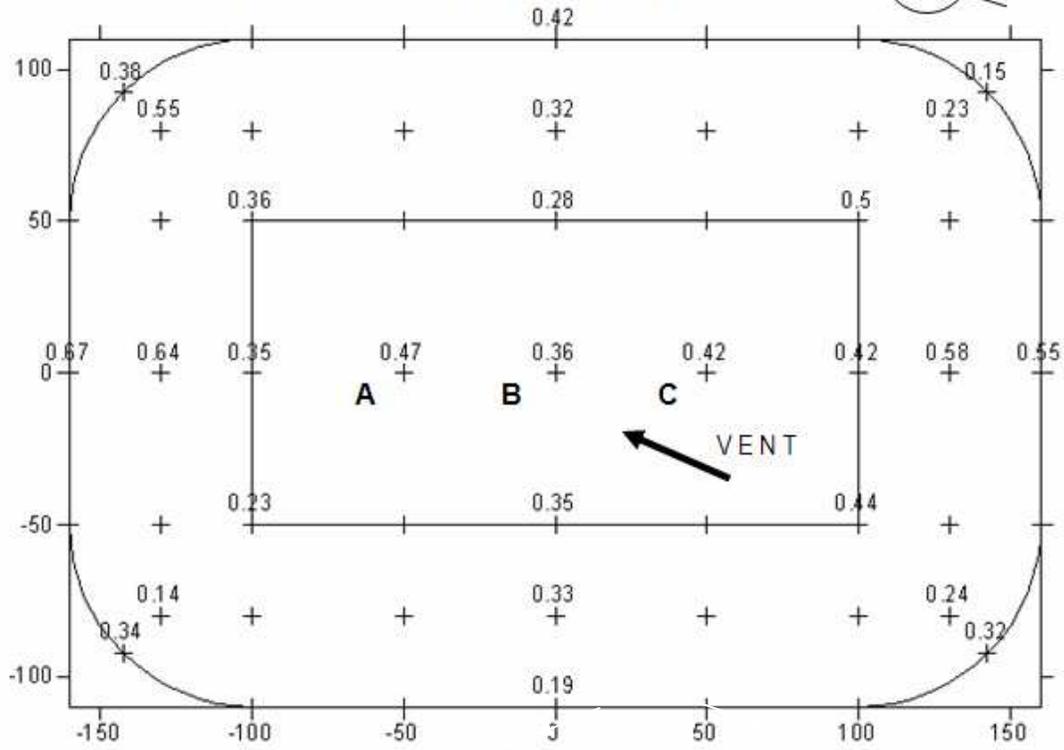
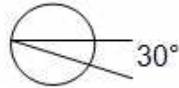
Description : La façade de cette configuration est divisée par quatre brèches horizontales uniformément réparties et elle est couverte par deux grilles de porosité à 50%, qui sont éloignées l'une de l'autre de 18 mètres en vraie grandeur. Les brèches horizontales séparent les gradins du niveau de l'aire de jeu, les différents niveaux des gradins entre eux, et la toiture des gradins. Chacune d'elles mesurent 4.5 mètres de hauteur. La toiture couvre l'intégralité des gradins.

Cette configuration est une extension des configurations où le paramètre varié est la porosité de la façade. Le nombre de points de mesures est réduit selon le protocole expérimental, mais même ce nombre réduit va permettre d'observer les tendances concernant les caractéristiques de l'écoulement en fonction de la position et du nombre d'écrans poreux.

Résultats : La ventilation est moins intense que celle de la configuration 10 (dont la façade divisée par 4 brèches horizontales et est couverte par une grille 50% de porosité), ce qui est indiqué par les valeurs de $\bar{\Psi}$, de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ moins importantes. Ceci montre, que l'augmentation du nombre des écrans entraîne une atténuation de l'écoulement.

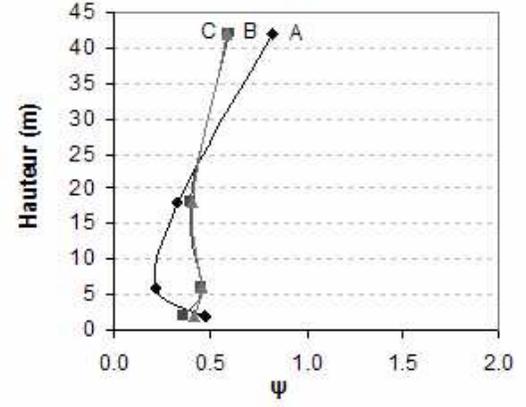
Les valeurs de $\bar{\Psi}$, de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ sont très proches des valeurs mesurées dans la configuration la plus protectrice comportant une façade complètement fermée (C4). Cependant, celle de la C17 sont légèrement plus élevées que celles de la configuration précédente. Ceci montre, que la présence des tribunes intensifie l'écoulement et contribue à la formation des zones dépressionnaires à l'intérieur du stade qui favorise la retombée du flux, générant des recirculations et des phénomènes tourbillonnaires.

C 18 - INCIDENCE DIAGONALE

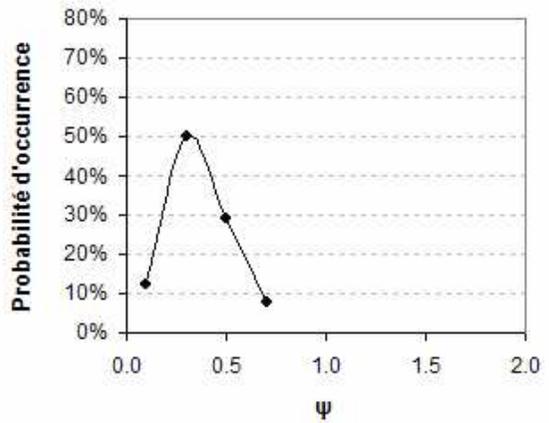


$\bar{\Psi} :$	0.37
$\sigma :$	0.15
$\Psi_{10\%} :$	0.17
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi} :$	0.46
$\Psi_{90\%} :$	0.61
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi} :$	1.65

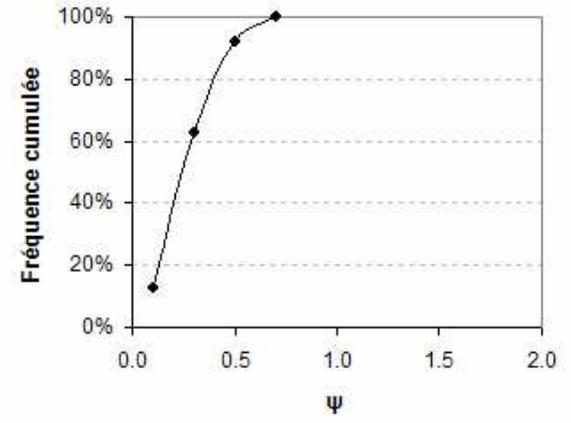
C 18 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



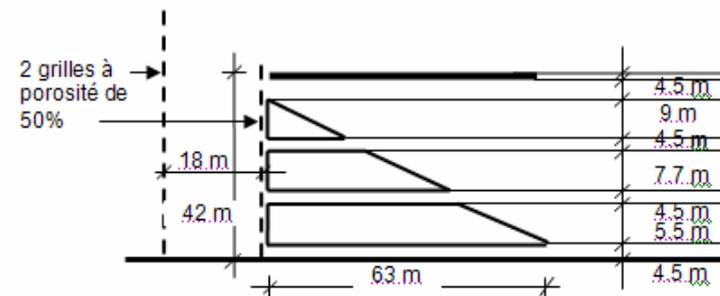
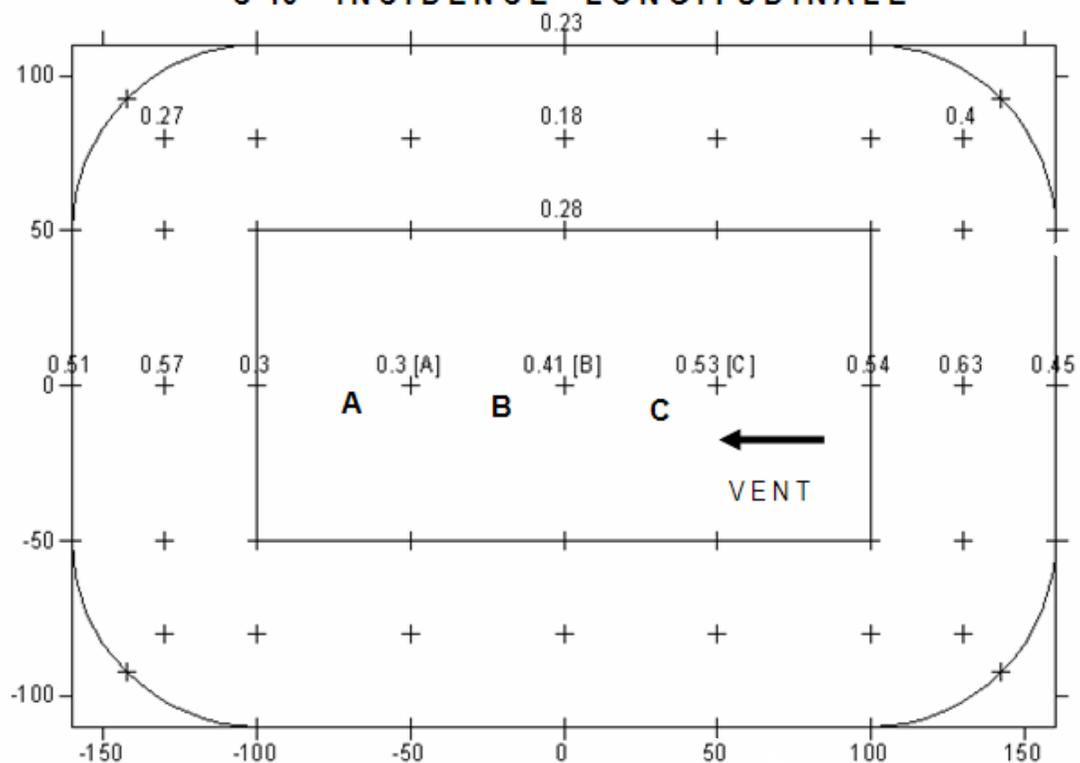
C 18 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 18 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

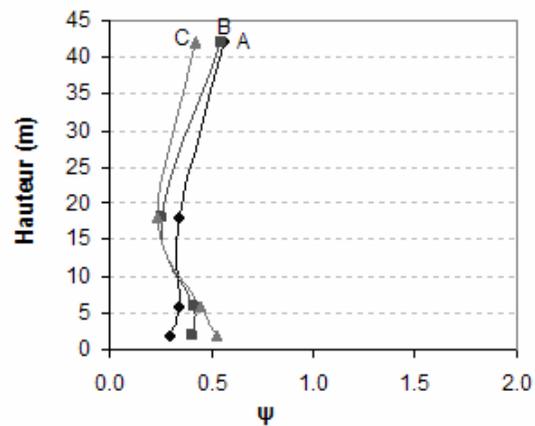


C 18 - INCIDENCE LONGITUDINALE

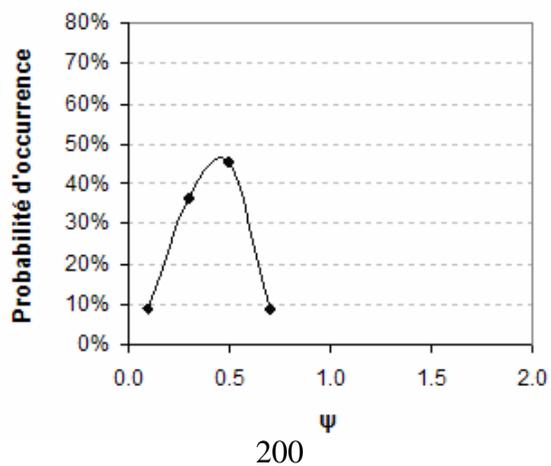


$\bar{\Psi}$:	0.40
σ :	0.15
$\Psi_{10\%}$:	0.21
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}$:	0.43
$\Psi_{90\%}$:	0.60
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}$:	1.57

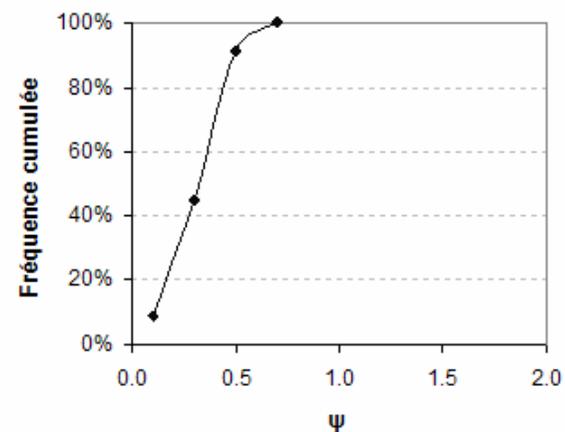
C 18 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



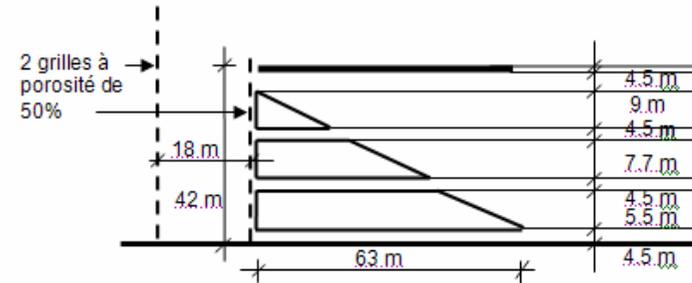
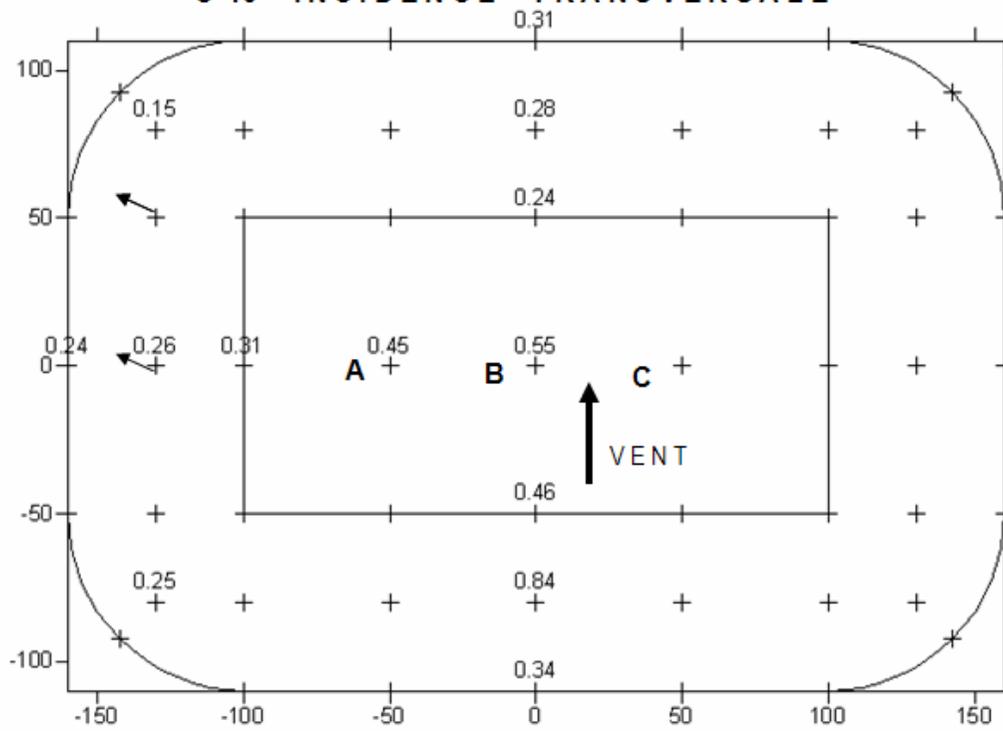
C 18 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 18 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

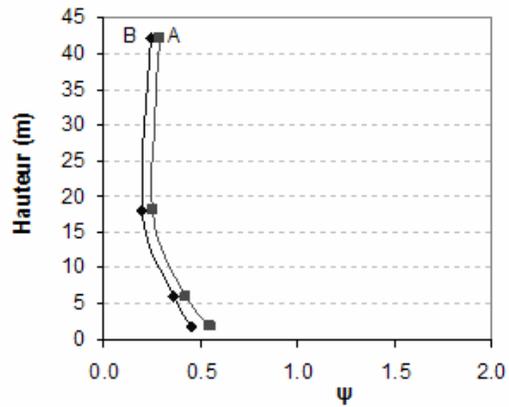


C 18 - INCIDENCE TRANSVERSALE

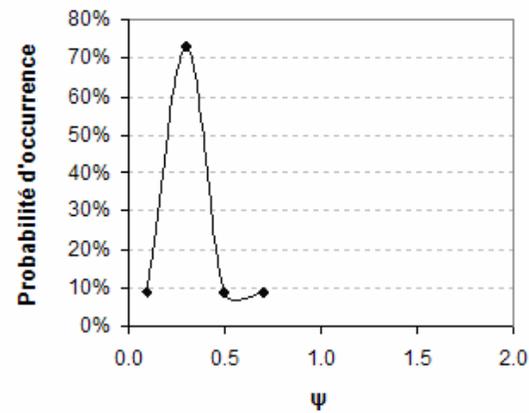


$\bar{\Psi}$:	0.33
σ :	0.18
$\Psi_{10\%}$:	0.20
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}$:	0.61
$\Psi_{90\%}$:	0.65
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}$:	1.97

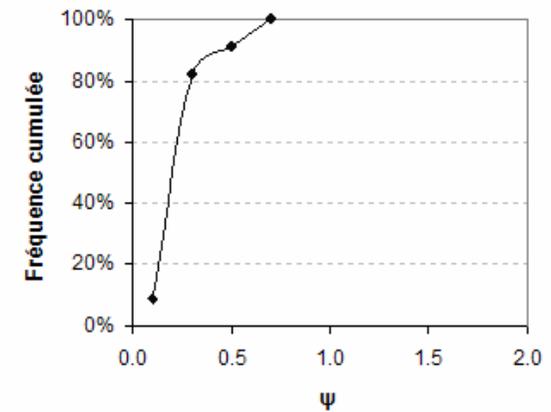
C 18 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu

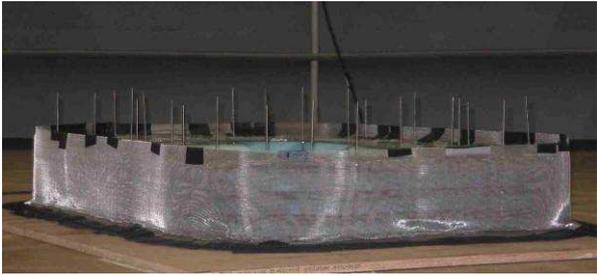
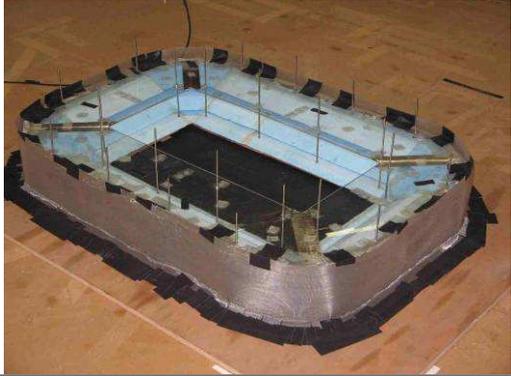


C 18 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 18 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ

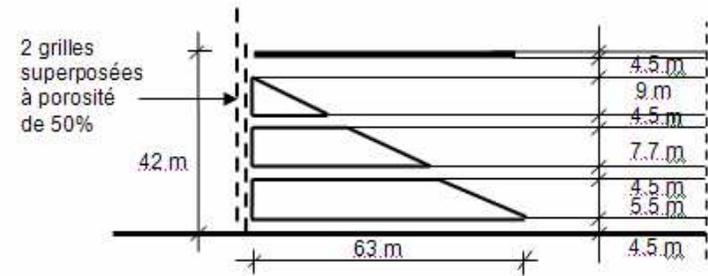
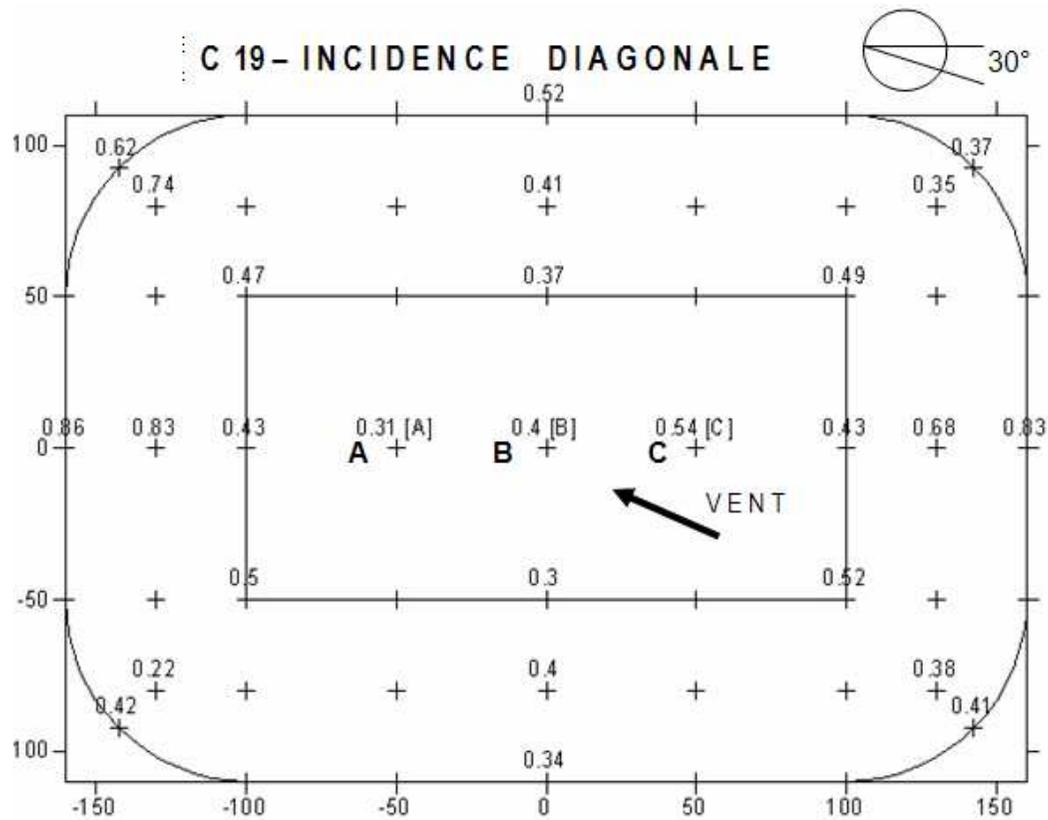


CONFIGURATION:	C19 – UNE VARIANTE DE C10 : FAÇADE COUVERTE PAR 2 GRILLES SUPERPOSEES				
COMPARER A :	C1, C10, C17, C18				
Incidence	$\bar{\Psi}$	$\Psi_{10\%}$	$\Psi_{90\%}$	IH 10%	IH 90%
Diagonale	0.50	0.32	0.83	0.64	1.66
Longitudinale	0.53	0.26	0.76	0.49	1.43
Transversale	0.48	0.26	0.61	0.54	1.27
					

Description : La façade de cette configuration est divisée par 4 brèches horizontales uniformément réparties et est couverte par deux grilles de porosité 50% superposées. Les brèches horizontales mesurent 4.5 mètres de hauteur. La toiture couvre l'intégralité des gradins.

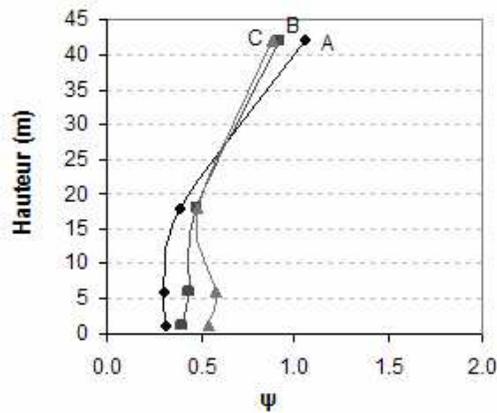
Cette configuration est une extension des configurations où le paramètre varié est la porosité de la façade. Le nombre de points de mesures est réduit selon le protocole expérimental, mais même ce nombre réduit va permettre d'observer les tendances concernant les caractéristiques de l'écoulement en fonction de la position et du nombre d'écrans poreux.

Résultats : La ventilation est globalement moins intense que celle de C10, ce qui est indiquée par des valeurs de $\bar{\Psi}$, de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ moins importantes. Cependant, ces valeurs sont plus élevées que celles de la configuration précédente (C18). Ceci montre, que deux écrans éloignés l'un de l'autre atténuent l'écoulement plus efficacement, que deux écrans superposés.

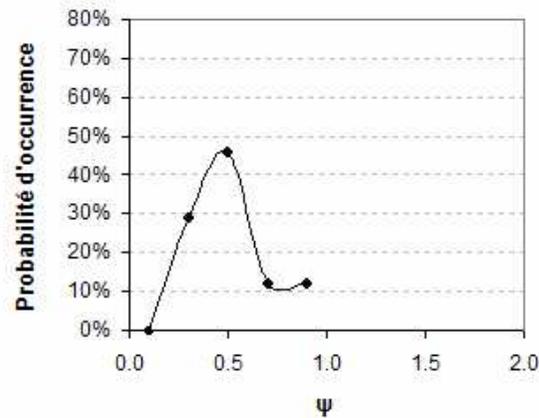


$\bar{\Psi} :$	0.50
$\sigma :$	0.18
$\Psi_{10\%} :$	0.32
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi} :$	0.64
$\Psi_{90\%} :$	0.83
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi} :$	1.66

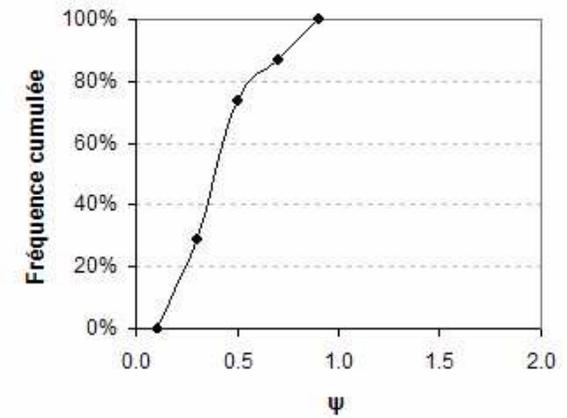
C 19 - incidence diagonale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



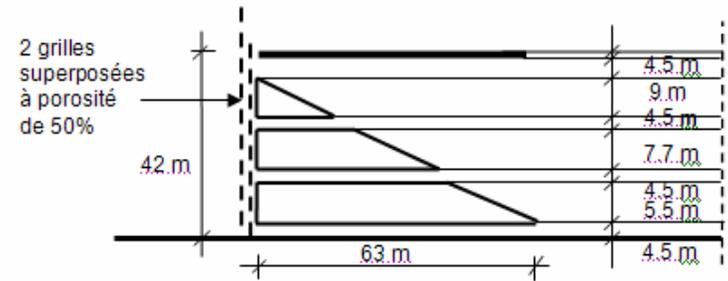
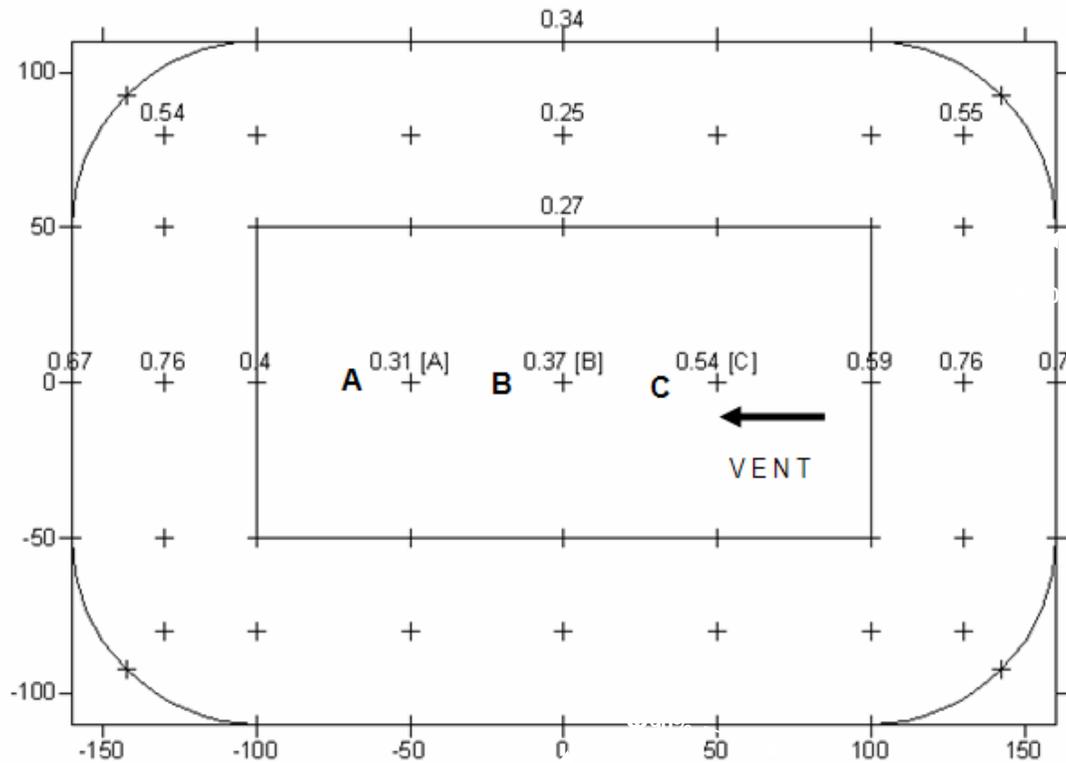
C 19 - incidence diagonale; Densité de probabilité de ψ



C 19 - incidence diagonale; Fréquence cumulée de ψ

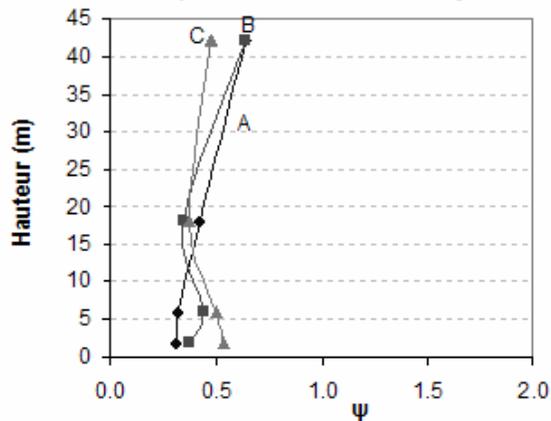


C 19 - INCIDENCE LONGITUDINALE

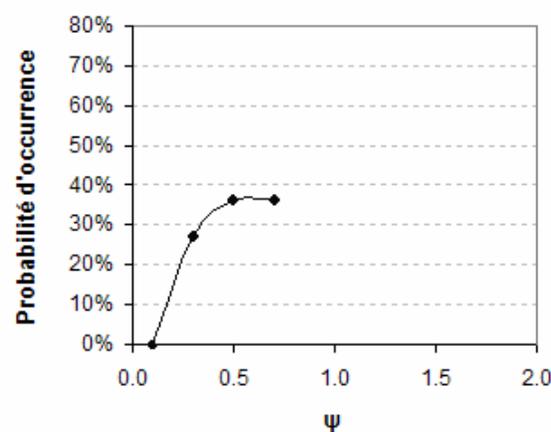


$\bar{\Psi}$:	0.53
σ :	0.19
$\Psi_{10\%}$:	0.26
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}$:	0.49
$\Psi_{90\%}$:	0.76
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}$:	1.43

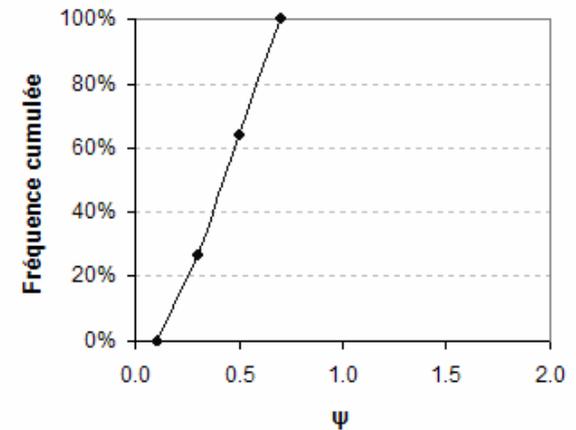
C 19 - incidence longitudinale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



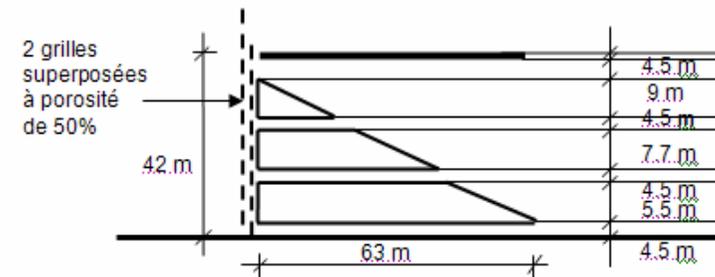
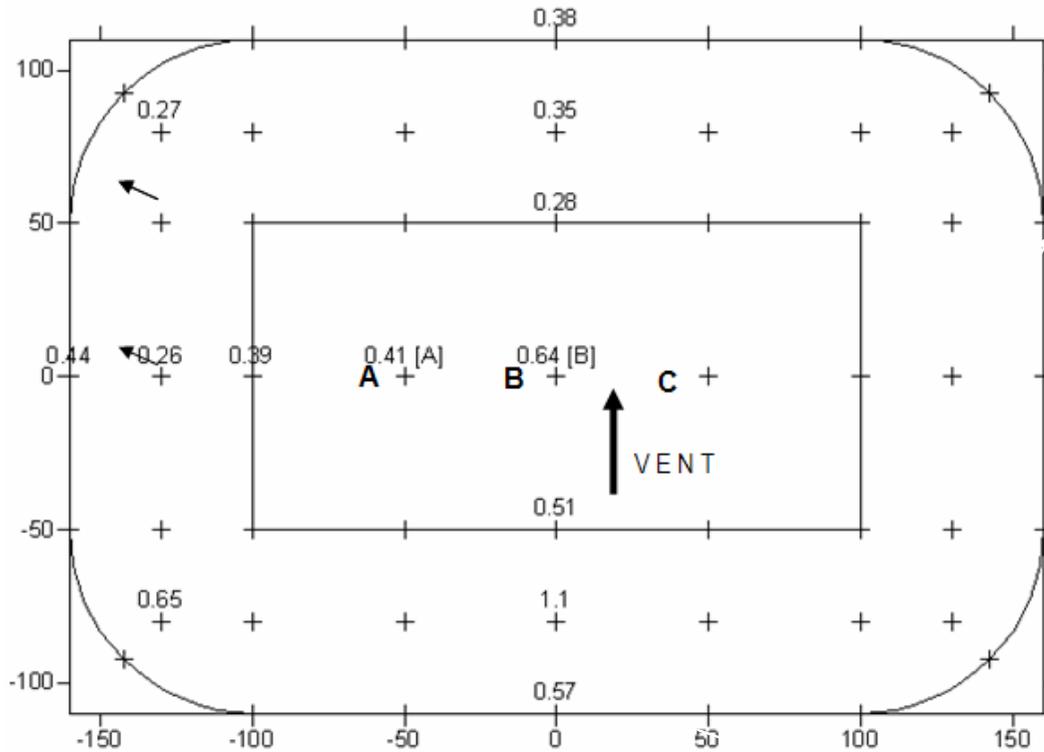
C 19 - incidence longitudinale; Densité de probabilité de ψ



C 19 - incidence longitudinale; Fréquence cumulée de ψ

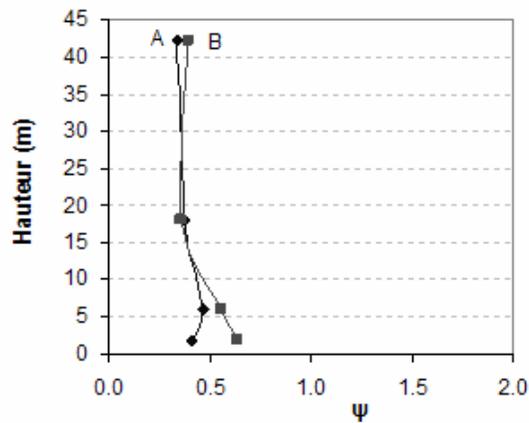


C 19 - INCIDENCE TRANSVERSALE

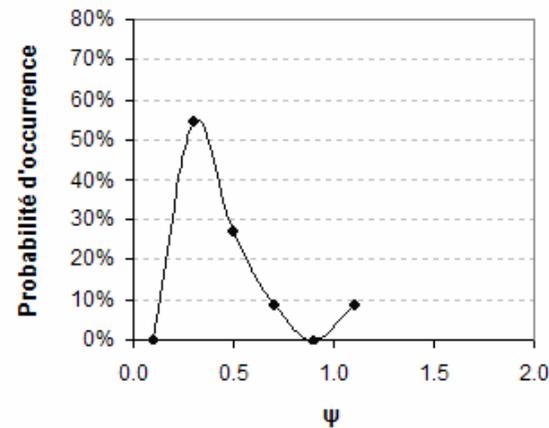


$\bar{\Psi}$:	0.48
σ :	0.25
$\Psi_{10\%}$:	0.26
$\Psi_{10\%} / \bar{\Psi}$:	0.54
$\Psi_{90\%}$:	0.61
$\Psi_{90\%} / \bar{\Psi}$:	1.27

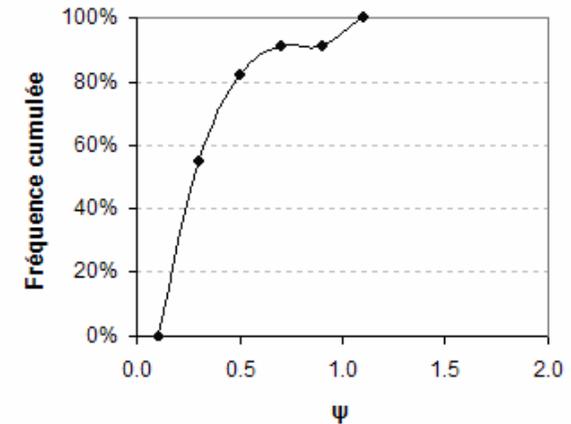
C 19 - incidence transversale; Evolution de ψ au-dessus de l'aire de jeu



C 19 - incidence transversale; Densité de probabilité de ψ



C 19 - incidence transversale; Fréquence cumulée de ψ



2. INFLUENCE DES DIFFÉRENTS PARAMETRES MORPHOLOGIQUES SUR L'ÉCOULEMENT DE L'AIR

Ce chapitre a pour objectif de valider l'hypothèse qu'il existe des relations fonctionnelles ou corrélations entre certains indices qui décrivent l'écoulement et les caractéristiques morphologiques du stade. Il vise également à décrire la nature de ces corrélations, et les tendances qui caractérisent le changement des conditions aérauliques en fonction de la morphologie du stade.

Les résultats des essais paramétriques ont mis en évidence que la morphologie du stade modifie significativement les caractéristiques de l'écoulement d'air au niveau des tribunes. Afin de pouvoir associer à chaque paramètre morphologique son propre effet aéraulique, au cours des essais paramétriques un seul paramètre a été changé à la fois. L'écoulement a été décrit par les valeurs caractéristiques de Ψ , notamment par la valeur moyenne ($\bar{\Psi}$), par le premier décile ($\Psi_{10\%}$) et par le dernier décile ($\Psi_{90\%}$). La valeur moyenne de Ψ marque les conditions moyennes aérodynamiques au niveau des gradins dans leur intégralité, tandis que les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$ désignent les conditions extrêmes au niveau des zones d'accélération et des zones de calme (Chapitre II 4). Ces indices permettent dans certains cas d'établir des corrélations entre les caractéristiques morphologiques et les caractéristiques de l'écoulement. Ainsi, il est possible de décrire les tendances de chaque géométrie de stade par des fonctions de régressions et d'en déduire - par interpolation ou dans une certaine mesure par extrapolation - les conditions aérauliques également pour des valeurs de paramètres morphologiques non étudiées.

Dans le cadre de la campagne d'essais paramétriques vingt configurations du stade ont été testées pour trois incidences du vent. En conséquence, la quantité de données obtenue par mesure est importante, et encore plus importante si on considère les indices calculés à partir de ces données. Malgré cela, le nombre de données qui permettraient de définir des relations fonctionnelles plus précises entre les indices caractérisant l'écoulement et les différents paramètres morphologiques du stade, est limité. **Toutefois, ce nombre de points permet d'une part de décrire les tendances de variation de certains indices caractérisant l'écoulement en fonction du changement de paramètres morphologiques** (Exemple : monotone, non monotone, croissante, décroissante etc.) et d'autre part de juger l'échelle de l'effet modificatif de ces paramètres (Exemple : significatif, négligeable etc.).

En ce qui concerne les fonctions qui décrivent ces tendances il est possible que des extrema existent localement entre les points mesurés. Ceci est d'autant plus probable, si la fonction n'est pas monotone. Si la fonction est monotone, l'existence d'un point d'inflexion intermédiaire - entre deux points de mesure - reste possible, celle d'un point d'interruption est pratiquement exclue, et celle d'une coupure est totalement improbable. Bien évidemment la description plus précise des relations fonctionnelles nécessiterait un nombre plus important de configurations architecturales. Néanmoins, l'analyse des données obtenues aux cours des

essais paramétriques confirme l'hypothèse posée, notamment l'existence de relations entre les caractéristiques de l'écoulement et la morphologie du stade et illustre les tendances de variation de certains indices qui caractérisent l'écoulement.

2.1 EFFET DE LA POROSITÉ DE FAÇADE

La porosité est le rapport entre la surface des ouvertures et la surface totale de la façade. Ainsi, une valeur plus importante de la porosité, signifie une surface plus importante des ouvertures par rapport à la surface totale de la façade. Les ouvertures sont les "espaces vides" de différents sortes de la façade :

- Brèches horizontales ou verticales séparant les différents niveaux ou secteurs des tribunes;
- Brèches horizontales entre la toiture et les tribunes, ou entre le niveau de l'aire de jeu et la tribune;
- Brèches aux virages du stade.

Au cours des essais paramétriques plusieurs sortes de porosité ont été testées :

- Porosité constituée de brèches périphériques horizontales uniformément réparties avec ou sans écrans brise-vent (Exemple : la configuration 8 (C8), où la façade est divisée par quatre brèches horizontales qui séparent le niveau de l'aire de jeu du premier niveau des gradins, les différents niveaux des gradins et la toiture des gradins);
- Porosité constituée de brèches horizontales périphériques concentrées (Exemple : la configuration 7 (C7), où l'ouverture apparaît sous la forme d'une brèche horizontale de hauteur augmentée (9 mètres en vraie grandeur) qui sépare la toiture des gradins);
- Porosité constituée de brèches verticales concentrées dans les virages (Exemple : la configuration 14 (C14), où les angles sont complètement ouverts);
- Porosité constituée de brèches verticales uniformément réparties (Exemple : la configuration 16 (C16), où les gradins inférieurs sont continus et les gradins supérieurs sont divisés par des brèches verticales de largeur de 6 mètres uniformément distribuées).

Les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes sont définies non seulement par la mesure de la porosité de la façade, mais encore par la répartition de cette porosité. Une porosité qui est constituée de brèches uniformément réparties ne modifie pas les caractéristiques de l'écoulement de la même façon qu'une brèche concentrée, même si les deux ont des valeurs de porosité identiques.

2.1.1 Premier groupe de porosité : brèches horizontales périphériques

Le premier groupe se constitue des configurations comportant des brèches périphériques horizontales uniformément réparties sur toute la surface de la façade. Ces brèches sont occupées ou non par des écrans brise-vent. Le Tableau 12 illustre le premier groupe de configurations : la configuration 8 (C8), 9 (C9), 10 (C10), 18 (C18) et 19 (C19).

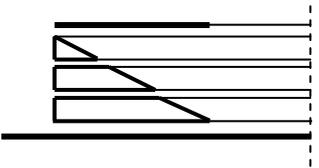
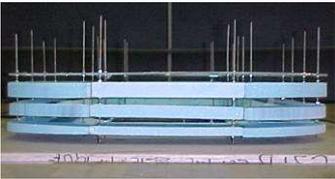
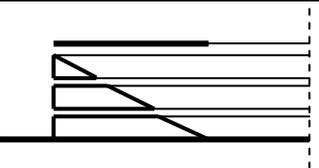
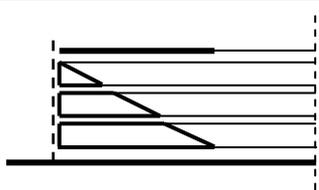
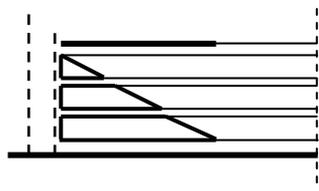
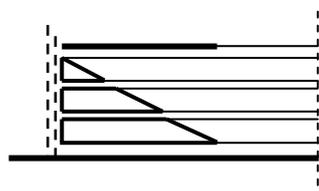
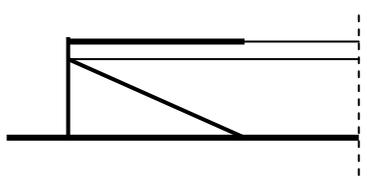
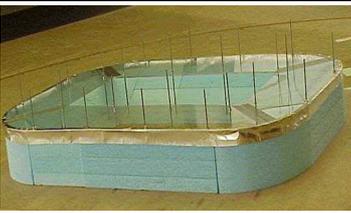
C8 – FACADE DIVISEE PAR 4 BRECHES HORIZONTALES		
		Porosité \approx 40%
C9 – FACADE DIVISEE PAR 3 BRECHES HORIZONTALES		
		Porosité \approx 30%
C10 – FACADE DIVISEE PAR 4 BRECHES HORIZONTALES ET COUVERTE PAR UNE GRILLE METALLIQUE DE POROSITE A 50%		
		Porosité \approx 20%
C18 – UNE VARIANT DE C10 : FAÇADE COUVERTE PAR 2 GRILLES DE POROSITE A 50% ELOIGNEES ET SUPERPOSEES		
		Porosité \approx 10%
C19 – UNE VARIANT DE C10 : FAÇADE COUVERTE PAR 2 GRILLES METALLIQUES SUPERPOSEES DE POROSITE A 50%		
		Porosité \approx 10%
C4 – FACADE FERMEE (SANS BRECHES)		
		Porosité =0%

Tableau 12 : Premier groupe de configurations : la porosité est constituée des brèches périphériques horizontales uniformément réparties sur toute la surface de la façade.

Dans en premier temps, les valeurs caractéristiques de Ψ , notamment la valeur moyenne ($\bar{\Psi}$), le premier décile ($\Psi_{10\%}$) et le dernier décile ($\Psi_{90\%}$) de Ψ qui décrivent chaque configuration de différentes sortes de porosités sont étudiées. Ils sont comparés à la configuration 4 (C4) comportant une façade complètement fermée (porosité de 0%).

L'insertion des ouvertures horizontales dans la façade implique une croissance globale en ce qui concerne les valeurs de $\bar{\Psi}$ pour les trois incidences de vent (diagonale, longitudinale et transversale). Elles sont supérieures à celles de la configuration 4 (C4). Cela indique que **la présence de brèches ou ouvertures horizontales diminue la capacité protectrice globale du stade.**

La configuration 8 (C8), qui possède une façade divisée par quatre brèches périphériques horizontales uniformément réparties sur la surface entière de la façade, provoque la multiplication des valeurs de $\bar{\Psi}$ par environ 2.3 par rapport à la configuration 4 (C4). En revanche, une configuration identique dont la façade est couverte par une grille métallique à 50% de porosité : la configuration 10 (C10) augmente ces valeurs d'un facteur 1.5 par rapport à la configuration 4 (C4). En comparant les valeurs de $\bar{\Psi}$ aux valeurs de cette dernière, on observe une augmentation des valeurs de $\bar{\Psi}$ d'un facteur 1.3 pour la configuration 19 (C19) où la façade est couverte par deux grilles métalliques superposées chacune présentant une porosité de 50%.

La configuration 9 (C9) dont la façade est divisée par 3 brèches horizontales (la brèche qui sépare l'aire de jeu du premier niveau des tribunes est bouchée), semblablement à la configuration 8 (C8), augmente les valeurs de $\bar{\Psi}$ significativement, d'un facteur d'environ 2.1, par rapport à la configuration 4 (C4). La tendance est illustrée par une courbe polynomiale sur la Figure 82 pour les trois incidences du vent. L'ajustement d'une loi polynomiale de deuxième ordre semble illustrer les tendances par incidence correctement et donne des coefficients de corrélations proches de 1. Cependant cet ajustement est valable uniquement dans la gamme de porosité étudiée.

On observe, pour les trois incidences étudiées, dans une gamme de porosité de 0 à environ 40%, une forte croissance des valeurs de $\bar{\Psi}$ avec l'augmentation de la porosité de la façade.

Les valeurs de $\bar{\Psi}$ croissent pour chaque direction jusqu'à une certaine mesure, et elles tendent vers une asymptote. Cette asymptote peut être définie comme la valeur moyenne de Ψ pour chaque point de mesure, au niveau des tribunes, si la mesure était réalisée *sans le stade*. Cette asymptote indique ainsi les valeurs de $\bar{\Psi}$ d'un stade qui comporte une toiture infiniment fine (sans effet aérodynamique) et une façade de 100% de porosité (absence de façade). Evidemment, les valeurs très élevées de porosité n'ont pas de sens pratique.

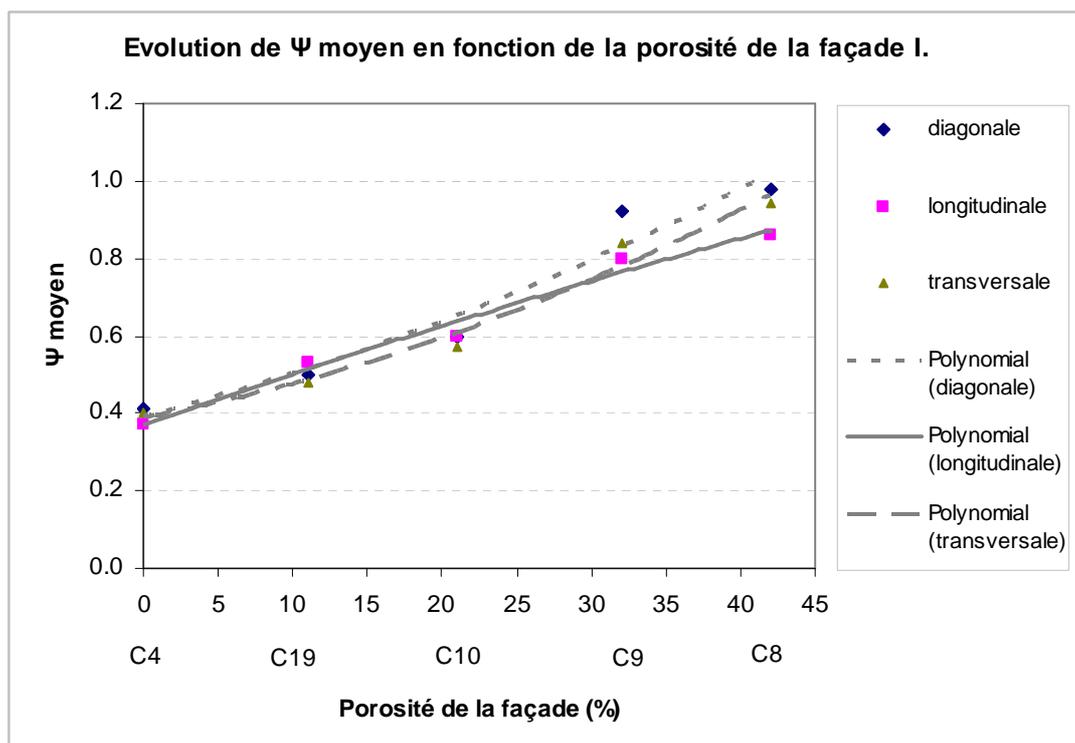


Figure 82 : Evolution des valeurs de $\bar{\Psi}$ en fonction de la porosité de la façade pour le premier groupe de porosité des configurations dans la gamme de la porosité ayant un sens pratique : de 0 à ~40%

Quant aux valeurs de déciles de Ψ , elles sont également drastiquement modifiées par la variation de la porosité de la façade. Les valeurs de $\Psi_{90\%}$ et de $\Psi_{10\%}$ sont augmentées en raison de l'insertion des brèches horizontales dans la façade.

La Figure 83 illustre l'évolution des valeurs de $\Psi_{10\%}$ en fonction de porosité de la façade pour les quatre configurations dont la façade est divisée par des brèches périphériques uniformément réparties sur toute la surface de la façade et pour la configuration 4 (C4).

La configuration 8 (C8) possède les valeurs de $\Psi_{10\%}$ les plus élevées parmi ces 5 configurations. Ces valeurs dépassent 0.5, alors que celles des quatre autres configurations - de configuration 4 (C4), de configuration 8 (C8), de configuration 10 (C10) et de configuration 19 (C19) - restent en-deçà de 0.4. Les valeurs de $\Psi_{10\%}$ de ces quatre configurations n'indiquent pas une variation importante : elles se trouvent entre 0.2 et 0.4. Les courbes illustrent la tendance et l'échelle de la variation de ces indices caractérisant l'écoulement en fonction de la porosité de la façade.

L'ajustement d'une loi polynomiale semble indiquer une corrélation moins forte entre les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et la porosité de la façade qu'entre la porosité et les valeurs de $\bar{\Psi}$. Ceci est probablement dû à la configuration 9 (C9), où non seulement l'échelle de la porosité est modifiée, mais également sa répartition, ce qui induit probablement un "biais" dans l'analyse des données compte tenu du nombre limité de points constituant l'échantillon.

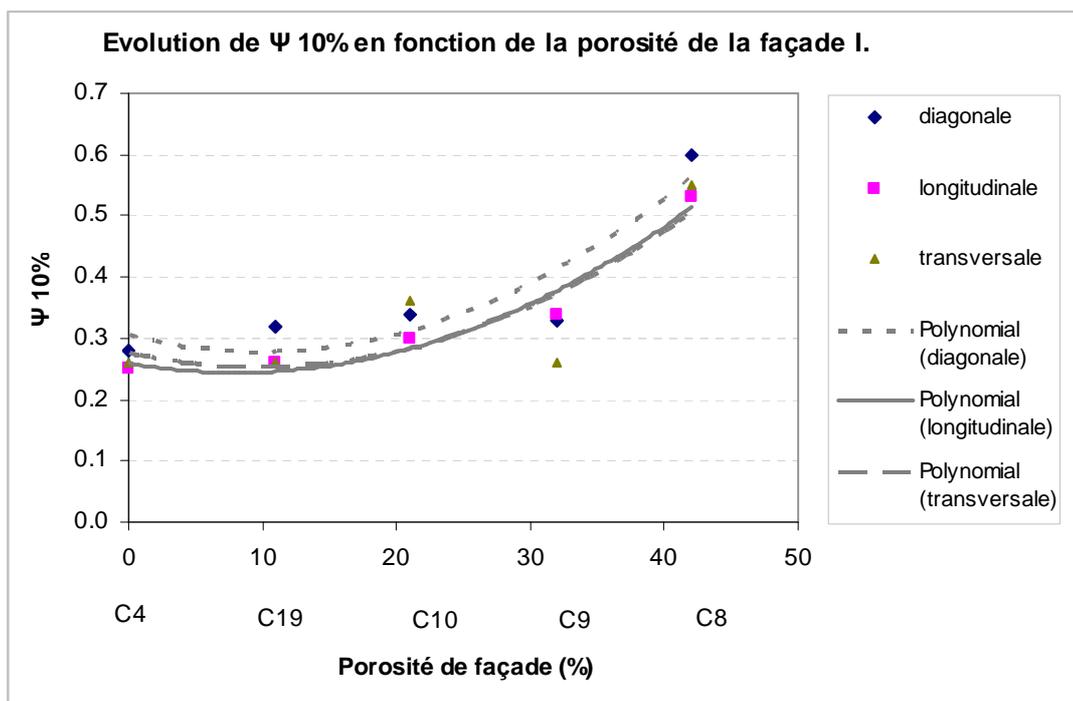


Figure 83 : Evolution des valeurs de $\Psi_{10\%}$ en fonction de la porosité de la façade

Néanmoins, l'ajustement semble indiquer une corrélation qui semble devenir plus forte quand uniquement les configurations comportant des brèches horizontales périphériques réparties d'une façon identique sont comparées. Cela signifie que la taille et l'emplacement des brèches sont identiques, c'est uniquement la porosité des écrans brise-vent qui varie. La tendance est illustrée par la Figure 84.

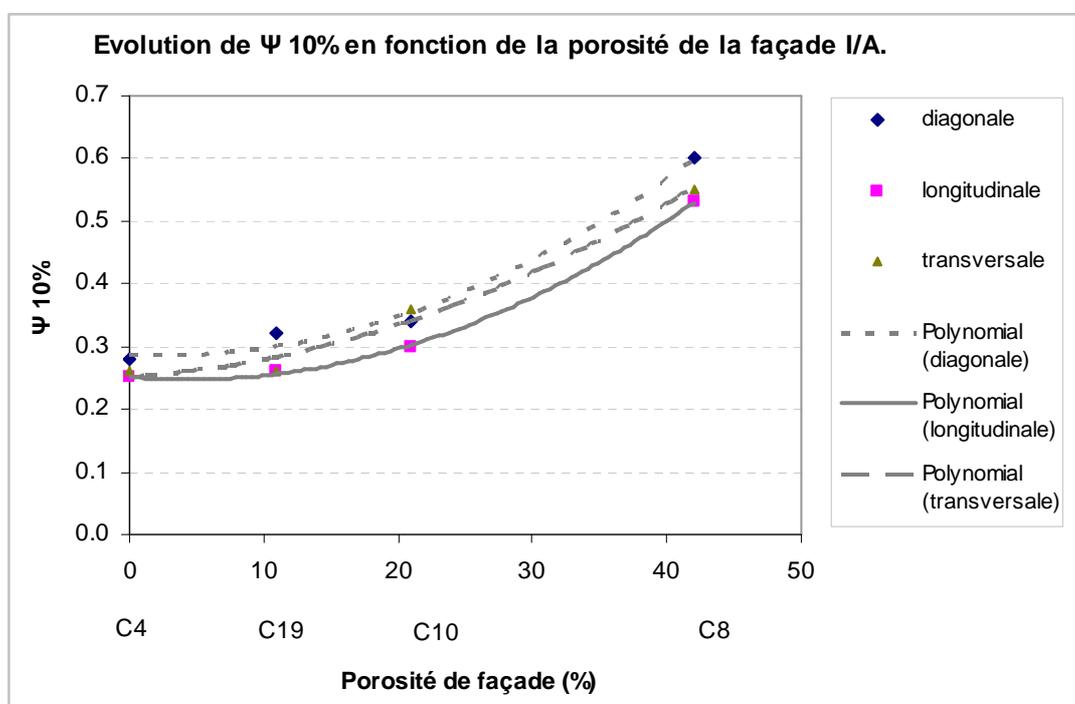


Figure 84 : Valeurs de $\Psi_{10\%}$ en fonction de la porosité de la façade sans la configuration 9 (C9)

La Figure 84 illustre également que la porosité (ou perméabilité) d'un écran brise-vent introduit dans son sillage un effet protecteurs systématique, et cet effet est d'autant plus fort que le taux de porosité est réduit. Ainsi la configuration 19 (C19) dont la façade comportant 4 brèches horizontales, est couverte par deux écrans de porosité à 50% conduit aux valeurs de $\Psi_{10\%}$ légèrement réduites par rapport à la configuration 10 (C10) dont la façade divisée par 4 brèches horizontales est couverte par une écran de porosité à 50%. De plus, les valeurs appartenant à la configuration 19 (C19) sont deux fois moins élevées que celles appartenant à la configuration 8 (C8) dont la façade divisée par 4 brèches horizontales ne comporte pas d'écran brise-vent.

En comparant les valeurs de $\bar{\Psi}$ et celles de $\Psi_{10\%}$, les valeurs de $\bar{\Psi}$ semblent montrer moins de sensibilité à l'emplacement des ouvertures ou brèches, puisque les points des cinq configurations épousent relativement correctement la courbe de tendance. Cependant, les valeurs de $\Psi_{10\%}$ montrent une sensibilité à l'emplacement des ouvertures, comme c'est illustré par les Figures 83 et 84, où la corrélation semble être plus forte uniquement si les configurations concernées comportent des brèches disposées aux mêmes endroits.

La pente de courbe de tendance des valeurs de $\bar{\Psi}$ est plus forte que celle des valeurs de $\Psi_{10\%}$ des configurations comportant des brèches de même taille et de même emplacement et aussi que celle englobant toutes les configurations du premier groupe de porosité. Ceci signifie que la porosité a un effet modificatif légèrement plus important sur les valeurs de $\bar{\Psi}$, que sur les valeurs de $\Psi_{10\%}$.

La Figure 85 illustre la variation des valeurs de $\Psi_{90\%}$ en fonction de la porosité.

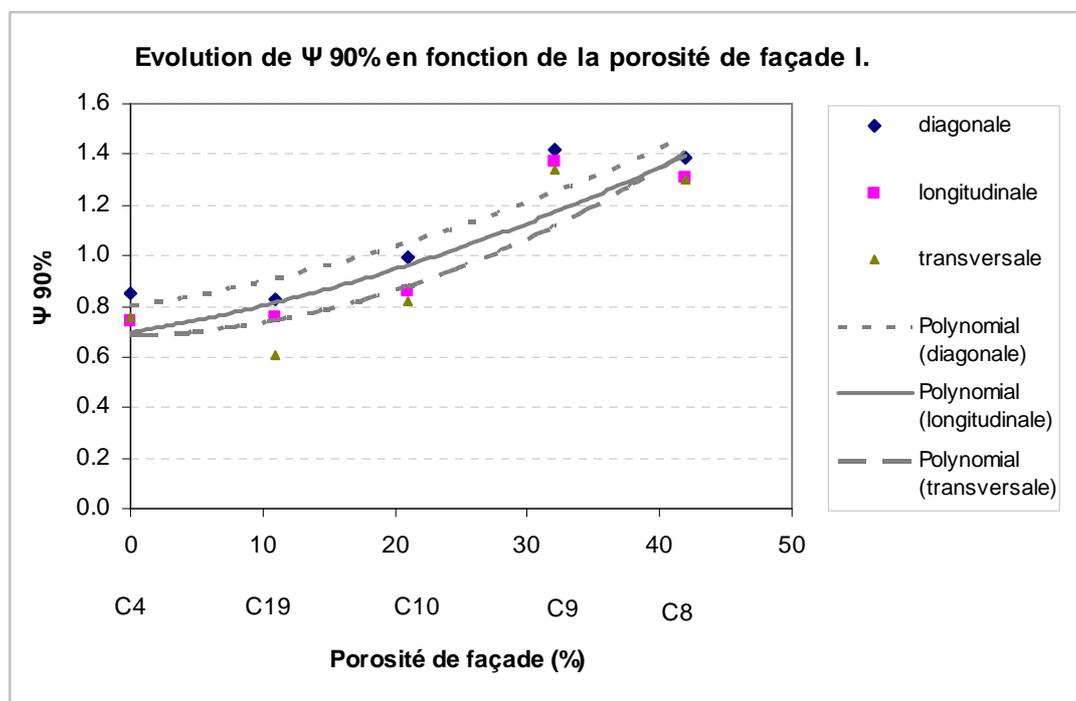


Figure 85 : Evolution des valeurs de $\Psi_{90\%}$ en fonction de la porosité de la façade

Les valeurs de $\Psi_{90\%}$ sont très élevées, elle équivalent environ à 1.3 – 1.4, non seulement pour la configuration 8 (C8), mais également pour la configuration 9 (C9). Cela montre l'existence de zones très

fortement ventilées, ce qui est probablement dû à l'existence des brèches horizontales. Les valeurs de $\Psi_{90\%}$ appartenant aux trois autres configurations (C4, C10 et C19) se situent autour de 0.9. Toutes les configurations montrent une variation relativement faible à l'incidence du vent, ce qui est également validé par les valeurs de $\bar{\Psi}$ et celles de $\Psi_{10\%}$.

La Figure 85 illustre que les valeurs de $\Psi_{90\%}$ de configuration 9 (C9), sont particulièrement importantes, elles dépassent celles de la configuration 8 (C8). Cela est vraisemblablement dû au fait, que dans la configuration 9 (C9) la brèche entre le premier niveau des tribunes et de niveau de l'aire de jeu est bouchée. En conséquence, le flux guidé à travers les trois brèches horizontales qui sont restées ouvertes, est plus intense par rapport à la configuration 8 (C8), ce qui implique une ventilation plus forte au niveau des tribunes.

L'emplacement des brèches semble donc avoir une influence également sur les valeurs de $\Psi_{90\%}$. La Figure 86 montre l'évolution de $\Psi_{90\%}$ pour les quatre configurations restantes : la configuration 4 (C4), la configuration 8 (C8), la configuration 10 (C10) et la configuration 19 (C19).

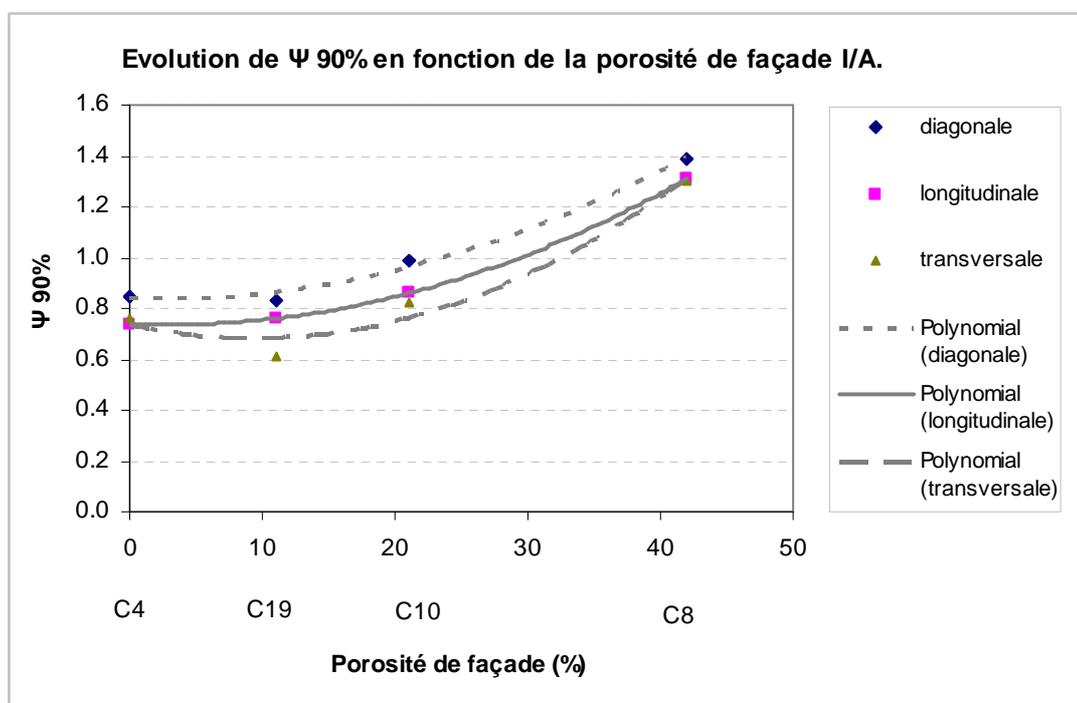


Figure 86 : Valeurs de $\Psi_{90\%}$ en fonction de la porosité de la façade sans la configuration 9 (C9)

Les courbes de tendance semblent montrer une corrélation plus forte quand, similairement au cas de $\Psi_{10\%}$, on ne considère que les configurations comportant des brèches horizontales d'un emplacement identique, soit couvertes par des écrans brise-vent de porosité variée, soit non couvertes par celles-ci.

Le rapport entre les valeurs de $\bar{\Psi}$ et de déciles de Ψ illustre la dispersion de population des données pour chaque configuration. Plus cette dispersion est petite, plus l'écoulement est homogène. L'homogénéité de l'écoulement est caractérisée par deux indices obtenus à partir des valeurs de $\bar{\Psi}$ de déciles de Ψ [Chapitre II. 3.] :

- IH10% est le rapport entre le $\Psi_{10\%}$ et le $\bar{\Psi}$,
- IH 90% est le rapport entre le $\Psi_{90\%}$ et le $\bar{\Psi}$.

Ces indices ne tiennent pas compte de l'aire de la zone concernée par les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et par celles de $\Psi_{90\%}$.

En dehors de la valeur de $\bar{\Psi}$, la qualité aéraulique d'une configuration est jugée à partir de l'homogénéité de l'écoulement au niveau des tribunes. Plus l'écoulement est homogène, plus la qualité aéraulique de la configuration est favorable. Cela signifie que les indices d'homogénéité sont plus favorables, s'ils sont proches de 1.

La Figure 87 illustre la variation des indices d'homogénéité $IH_{10\%}$ et $IH_{90\%}$ pour les cinq configurations en fonction de la porosité de la façade.

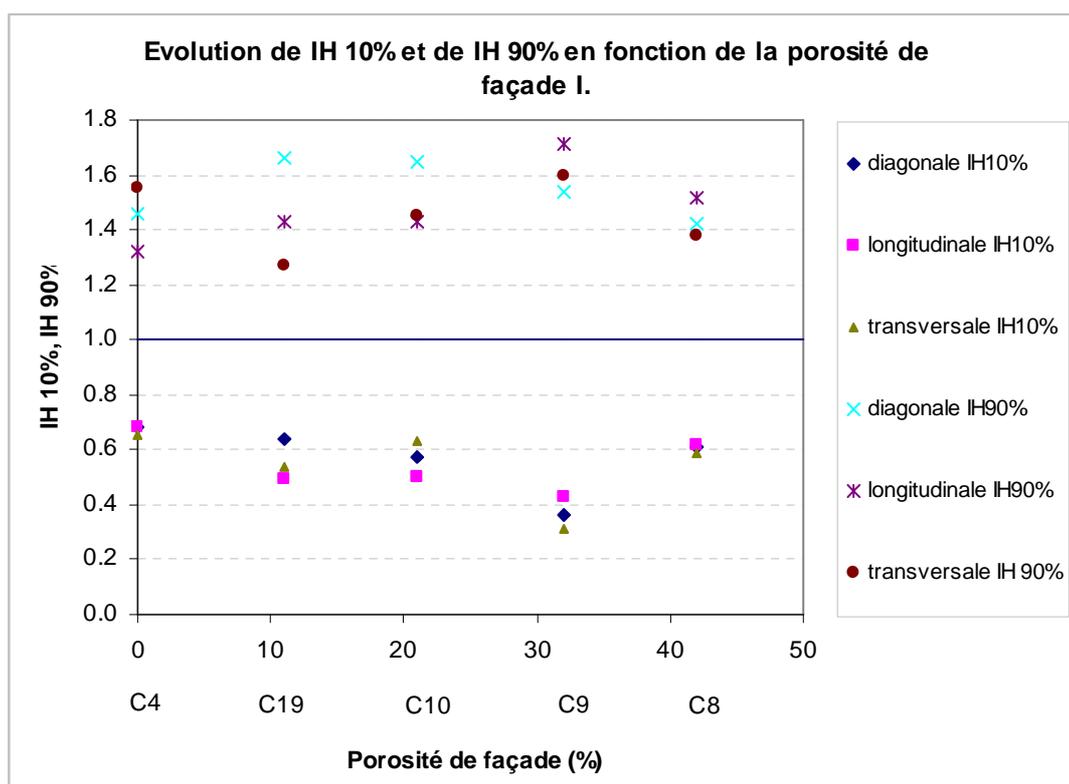


Figure 87 : Valeurs de $IH_{90\%}$ et $IH_{10\%}$ en fonction de la porosité de la façade

Les indices de homogénéité $IH_{90\%}$ se situent autour de 1.4 pour toutes configurations à l'exception de la configuration 9 (C9), où ces valeurs se trouvent autour de 1.6. Les indices d'homogénéité $IH_{10\%}$ varient autour d'environ 0.6 pour toutes configurations à l'exception de la configuration 9 (C9), où ces valeurs se situent autour de 0.4. Cela signifie que la dispersion des données de configuration 9 (C9) est plus importante que celles des quatre autres configurations. Cela indique que, dans la configuration 9 (C9) des zones très calmes et également des zones de forte accélération se développent au niveau des tribunes. La Figure 87 montre que la porosité n'a que peu d'effet sur les indices d'homogénéité pour les configurations comportant des brèches de localisation identique (C19, C8, C10). En revanche, **l'élimination de la brèche qui se situe entre le niveau de l'aire de jeu et le premier niveau des tribunes (C9) rend l'écoulement plus hétérogène**. Ceci est indiqué par l'éloignement des valeurs de déciles de Ψ de 1.

La Figure 88 illustre la variation de l'aire des zones concernées par les valeurs de $\Psi_{10\%}$, $\bar{\Psi}$ et de $\Psi_{90\%}$ par rapport à la surface totale des tribunes pour les trois incidences du vent. La Figure 88 contient uniquement les valeurs appartenant aux configurations 4 (C4), 8 (C8), 9 (C9) et 10 (C10), puisque la configuration 19 (C19) et la configuration 18 (18) représentant une extension des mesures et ne possèdent pas de données suffisantes qui permettaient de calculer l'aire des zones concernées par les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$.

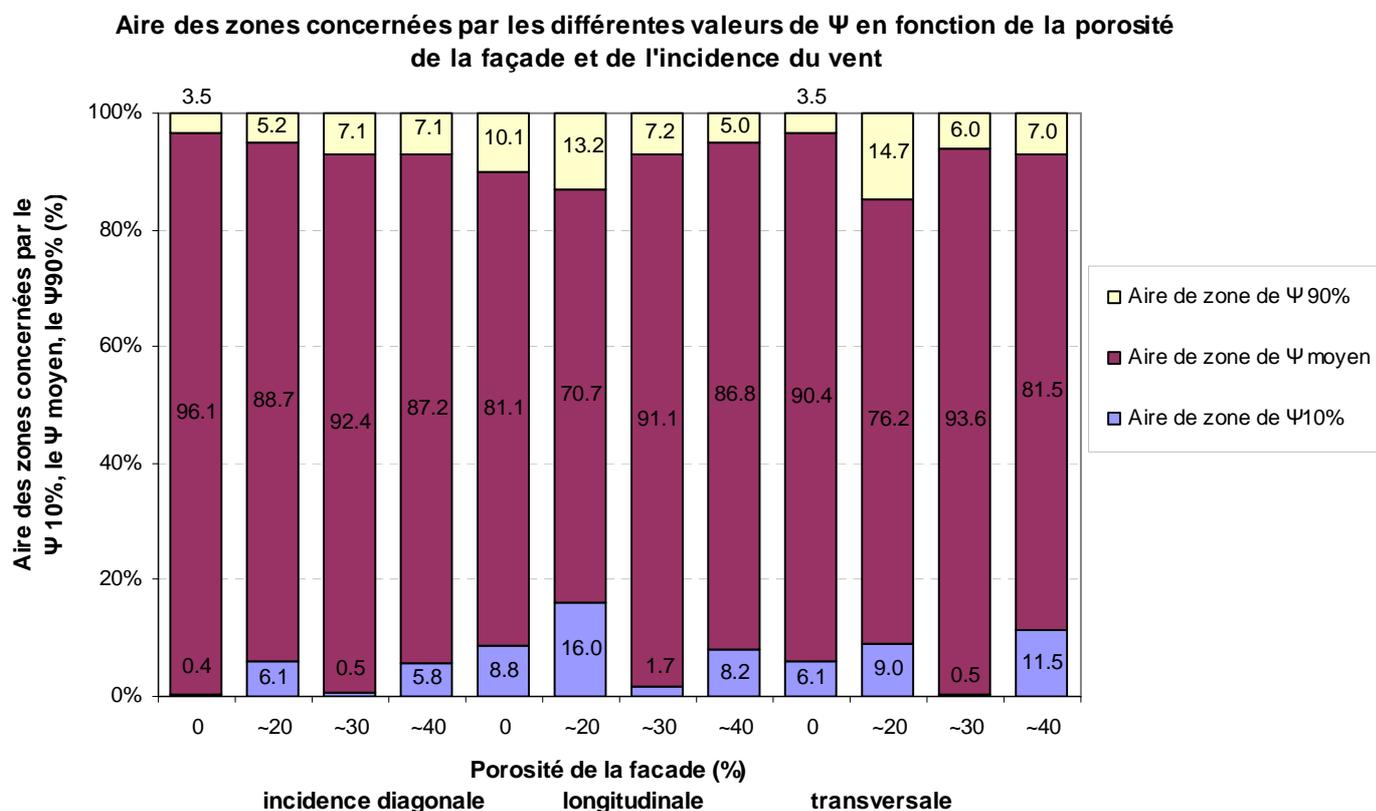


Figure 88 : Aire des zones concernées par le $\Psi_{10\%}$, le $\bar{\Psi}$ et le $\Psi_{90\%}$ en fonction de la porosité de la façade et de l'incidence du vent

Ce graphe permet de visualiser l'impact fonctionnel (en nombre de places par exemple) de l'hétérogénéité du stade. Une analyse qualitative correcte du stade requiert également l'examen simultané des valeurs de $\Psi_{10\%}$, $\bar{\Psi}$ et $\Psi_{90\%}$ ainsi que des indices d'homogénéité.

Evidemment, l'aire de zones concernées par la valeur de $\bar{\Psi}$ qui représente le 80% de la population des données, est la plus importante pour toutes les configurations et pour toutes les incidences du vent. En revanche, les aire concernées par les valeurs de déciles de Ψ sont réduites. Parmi ces configurations la surface maximale de la zone de $\Psi_{10\%}$ est d'environ 16%, pour la C10 et pour l'incidence longitudinale, et l'aire maximale de la zone de $\Psi_{90\%}$ est d'environ 15% également pour la C10, mais pour l'incidence transversale. Les différentes valeurs de Ψ et les aires concernées caractérisent ensemble les conditions aérauliques au niveau des tribunes. Une aire réduite mais associée aux valeurs élevées Ψ indique les zones très inconfortables localisées, qui peuvent être probablement traitées par les écrans brise-vent. Néanmoins,

une zone étendue associée à des valeurs élevées de Ψ peut signaler la nécessité de modification du choix de la configuration morphologique du stade.

2.1.2 Deuxième groupe de porosité : Brèches verticales périphériques et concentrées

Le deuxième groupe de porosité se constitue des configurations comportant des brèches verticales concentrées dans les angles et également des brèches verticales uniformément réparties sur le périmètre, au total trois configurations, notamment la configuration 14 (C14), 15 (C15) et 16 (C16). Ce groupe est présenté par le Tableau 13.

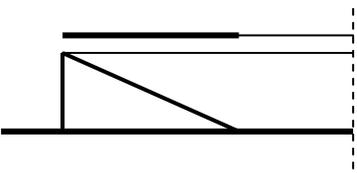
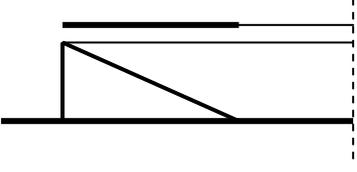
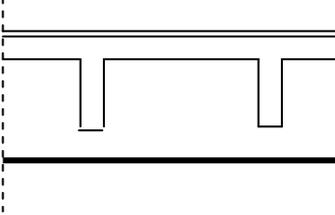
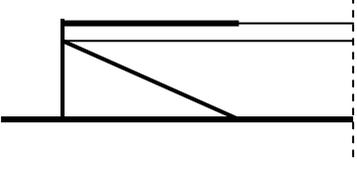
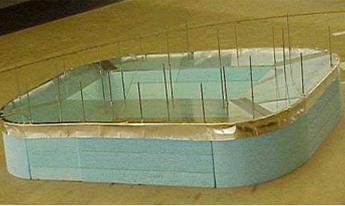
C14 – STADE AUX ANGLES OUVERTS		
		Porosité \approx 40%
C15 – STADE COMPORTANT DES BRECHES VERTICALES AUX ANGLES		
		Porosité \approx 4%
C16 – FACADE DIVISEE PAR DES BRECHES VERTICALES UNIFORMEMENT REPARTIES		
		Porosité \approx 16%
C4 – FACADE FERMEE (SANS BRECHES)		
		Porosité =0%

Tableau 13 : Deuxième groupe des configurations où la porosité est constituée des brèches périphériques verticales uniformément réparties sur toute la surface de la façade et des brèches verticales concentrées dans les angles.

De même que pour le groupe de porosité précédent, ces configurations sont comparées à la configuration 4 (C4) qui possède une façade complètement fermée.

La Figure 89 montre une augmentation des valeurs de $\bar{\Psi}$ avec la porosité de façade. Ces valeurs appartenant à la configuration 14 (C14) sont particulièrement importantes, elles dépassent celles de la configuration 16 (C16). Ceci est dû au fait, que la porosité de la configuration 14 (C14) est d'environ 2.5 fois plus importante que celle de la configuration 16 (C16).

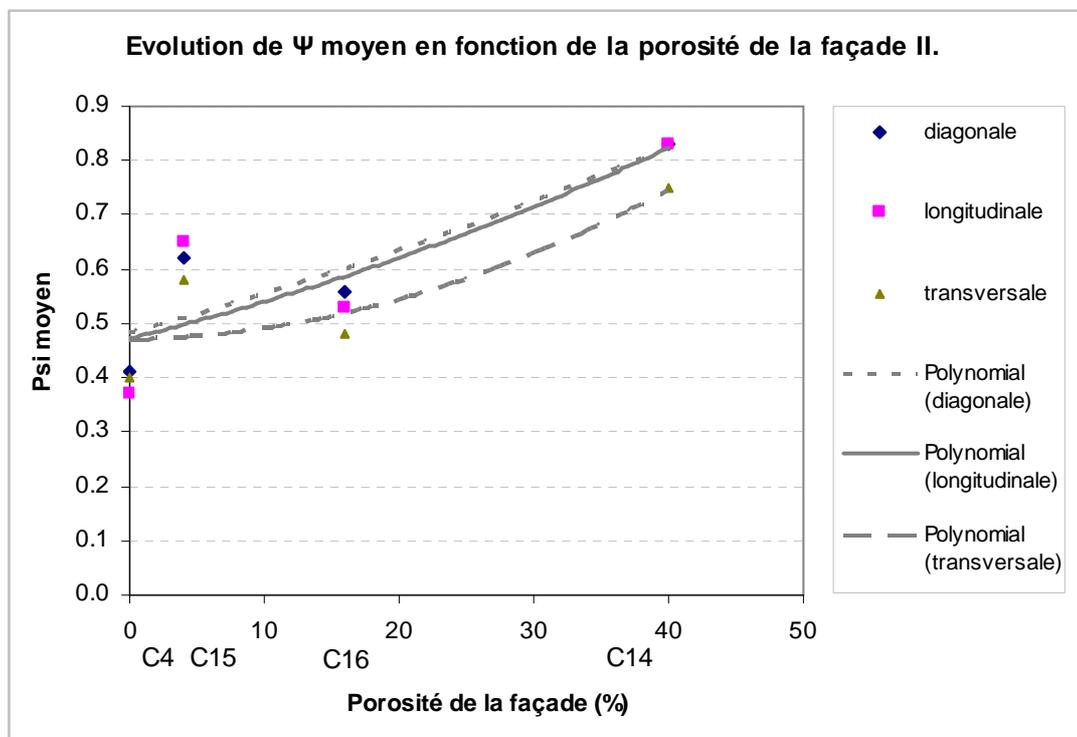


Figure 89 : Evolution des valeurs de $\bar{\Psi}$ pour le deuxième groupe de porosité des configurations

Cependant, les valeurs de $\bar{\Psi}$ appartenant à la configuration 15 (C15) sont supérieures à celles de configuration 16 (C16) avec un taux de porosité inférieur à celui de configuration 16 (C16). Ceci indique encore, que **si le taux de porosité est un facteur influent dans certaines configurations, la répartition des ouvertures sur la façade détermine très largement les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes** [Szucs *et al.*, 2005(2)]. En conséquence, les courbes de tendance ne montrent pas une corrélation forte avec la porosité dont la localisation varie pour les configurations de ce groupe de porosité. Globalement, **les ouvertures verticales étroites placées dans les angles induisent une ventilation localement plus importante, en forme de jets, que les ouvertures verticales uniformément réparties tout au long de la périphérie.**

La configuration 16 (C16) le stade comporte des gradins de deux sortes :

- les gradins inférieurs sont continus;
- les gradins supérieurs sont divisés par des brèches verticales uniformément réparties.

L'existence des gradins inférieurs contribue à l'atténuation de l'écoulement au niveau bas des tribunes et également au niveau de l'aire de jeu.

La Figure 90 illustre la tendance de variation des valeurs de $\Psi_{10\%}$: elle montre un profil semblable à celui des valeurs de $\bar{\Psi}$. La configuration 16 (C16) montre une capacité protectrice relativement importante par rapport à la configuration 14 (C14), où les virages sont ouverts. Les brèches périphériques uniformément réparties (C16) réduisent la ventilation, dans les zones concernées par les valeurs de $\Psi_{10\%}$, à un niveau comparable à celui de la configuration 4 (C4), où la façade est complètement fermée.

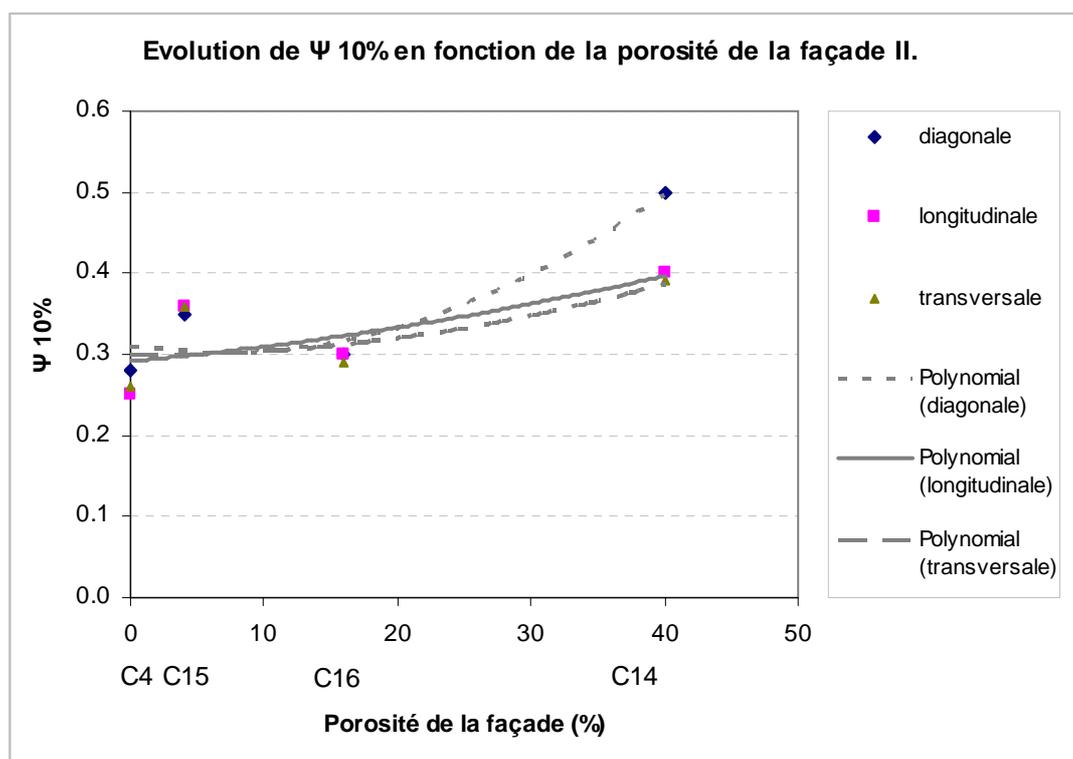


Figure 90 : Evolution des valeurs de $\Psi_{10\%}$ en fonction de la porosité de la façade

Les valeurs de $\bar{\Psi}$ semblent montrer une sensibilité à la variation de porosité constituée de brèches verticales légèrement plus importante, que les valeurs de $\Psi_{10\%}$, ce qui est indiqué par les mesures de pente des différentes courbes de tendance.

La Figure 91 montre les valeurs de $\Psi_{90\%}$ en fonction de porosité composée des brèches verticales concentrées et uniformément réparties. Les valeurs de $\Psi_{90\%}$ sont les plus importantes pour la configuration 14 (C14), où les gradins entiers sont intensivement ventilés en raison des angles ouverts. Evidemment, la configuration 4 (C4) possède les valeurs les moins élevées avec une porosité de façade qui équivaut à 0.

Les valeurs de $\Psi_{90\%}$ appartenant à la configuration 14 (C14) indiquent l'existence de zone le plus fortement ventilées parmi les configurations de ce groupe de porosité. Ces valeurs sont augmentées par un facteur 2 par rapport à la configuration 4 (C4)! De plus, elles ne montrent pas de sensibilité à l'incidence du vent. L'explication aérodynamique de ces valeurs élevées est que le contournement de l'écoulement aux angles ouverts du stade génère une accélération et une recirculation tourbillonnaire qui peuvent compromettre le confort des spectateurs dans ces zones. **Les brèches étroites dans les virages intensifient également la**

ventilation au niveau des tribunes par rapport à la configuration 4 (C4), ce qui est encore dû au contournement de l'écoulement aux angles qui contiennent des brèches verticales étroites. **L'écoulement rentre dans le stade en forme de jets et conduit à une ventilation forte dans les zones qui se situent à la proximité des brèches.**

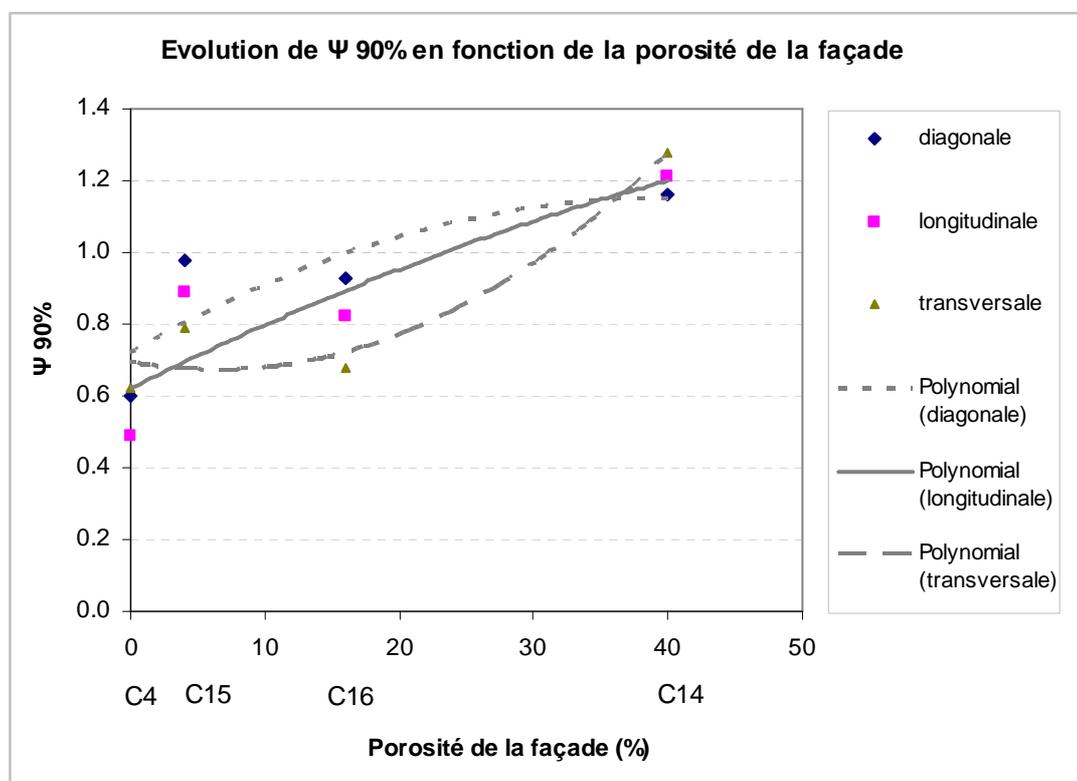


Figure 91 : Evolution des valeurs de $\Psi_{90\%}$ en fonction de la porosité de façade

Les brèches verticales uniformément réparties sur la périphérie augmentent aussi ces valeurs, en particulier celles de $\bar{\Psi}$ et de $\Psi_{90\%}$, néanmoins elles restent inférieures aux valeurs de configuration 15 (C15). Ceci signifie qu'**une configuration qui comporte des brèches périphériques verticales uniformément réparties conduit à une ventilation moins forte, que les configurations avec des brèches verticales concentrées.**

La Figure 92 illustre la variation des indices d'homogénéité IH10% et IH 90%. La porosité semble avoir un faible effet sur ces indices : les indices IH 90%: montrent une croissance modérée de l'hétérogénéité avec l'augmentation de la porosité de la façade. Cependant les indices IH10% ne varient pratiquement pas avec la porosité.

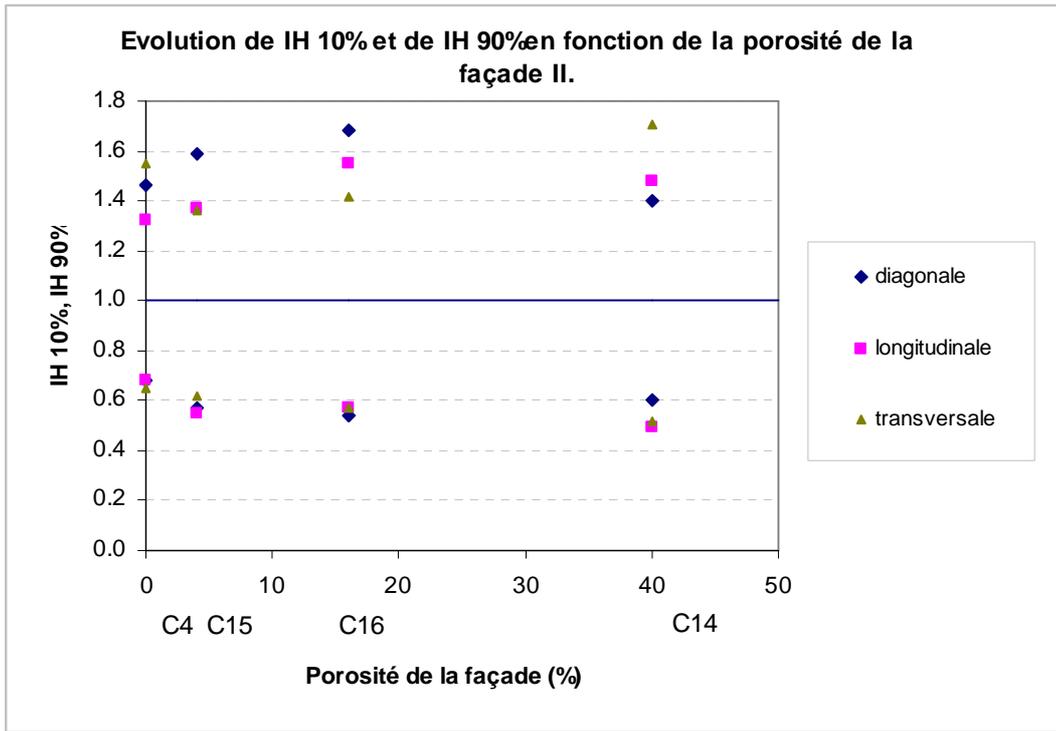


Figure 92 : Les valeurs de $IH_{90\%}$ (en haut) et $IH_{10\%}$ (en bas) en fonction de la porosité de la façade

La Figure 93 illustre la variation de l'aire des zones concernées par les valeurs de $\Psi_{10\%}$, $\bar{\Psi}$ et de $\Psi_{90\%}$ par rapport à la surface totale des tribunes pour les trois incidences du vent.

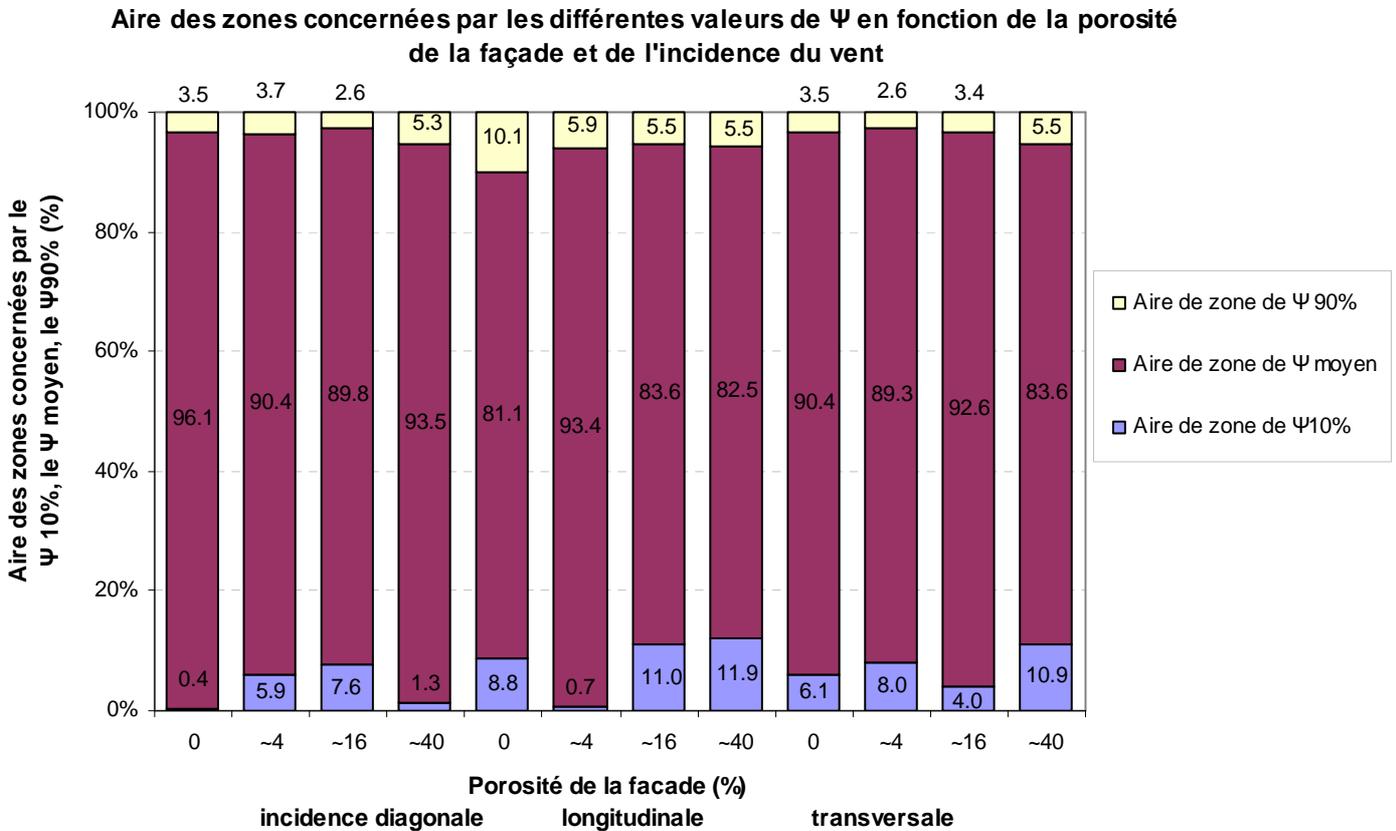


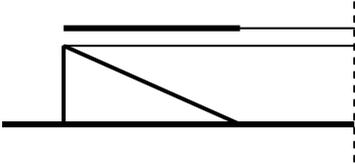
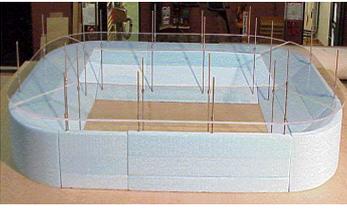
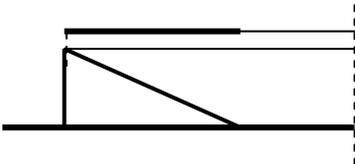
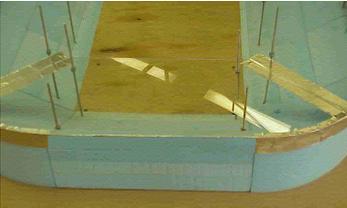
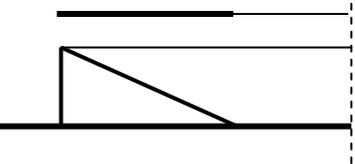
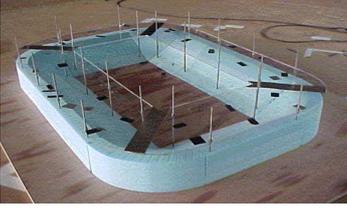
Figure 93 : Aire des zones concernées par le $\Psi_{10\%}$, le $\bar{\Psi}$ et le $\Psi_{90\%}$ en fonction de la porosité de la façade et de l'incidence du vent

La Figure 93 contient les valeurs appartenant aux configurations 4 (C4), 14 (C14), 15 (C15) et 16 (C16). L'aire de la zone concernée par le $\Psi_{10\%}$ est la plus importante pour la C14 pour l'incidence longitudinale (environ 12% de l'aire totale) tandis que l'aire de la zone où le $\Psi_{90\%}$ prévaut est la plus importante pour la C4, également pour l'incidence longitudinale.

2.1.3 Troisième groupe de porosité des configurations : Brèches horizontales concentrées

Le troisième groupe de porosité se constitue des configurations comportant des brèches horizontales concentrées qui se situent entre la toiture et les gradins. Trois configurations appartiennent à ce groupe : la configuration 1 (C1), la configuration 4Bis (C4Bis) et la configuration 7 (C7). Elles sont comparées au cas de "référence de porosité", à la configuration 4 (C4) qui comporte une façade de 0% de porosité, en d'autres termes une façade complètement fermée. Les résultats de ces configurations permettent de démontrer l'effet de l'augmentation de hauteur de la brèche horizontale entre la toiture et les gradins. Les résultats permettent également d'observer l'effet aérodynamique de ces brèches bouchées uniquement dans les angles mais ouvertes sur la périphérie du stade.

Ce groupe de porosité est présenté par la Tableau 14.

C1 – TOITURE HORIZONTALE		
		Porosité $\approx 10\%$
C4 BIS – BRECHE HORIZONTALE FERMEE AUX ANGLES MAIS OUVERT SUR LA PERIPHERIE		
		Porosité $\approx 4\%$
C7 – HAUTEUR DE BRECHE HORIZONTALE ENTRE LA TOITURE ET LES GRADINS AUGMENTEE		
		Porosité $\approx 20\%$

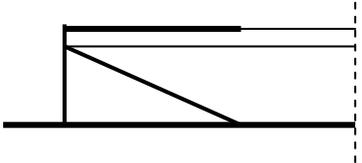
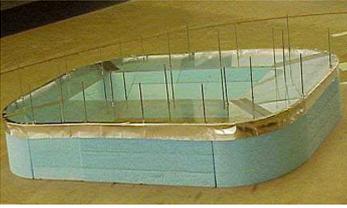
C4 – FACADE FERMEE (SANS BRECHES)		
		Porosité = 0%

Tableau 14 : Troisième groupe des configurations où la porosité est constituée de brèches horizontales localisées en façade entre la toiture et les gradins

La Figure 94 illustre les valeurs de $\bar{\Psi}$ en fonction de la variation de la porosité constituée de brèches horizontales concentrées. Les valeurs de $\bar{\Psi}$ augmentent avec le taux de porosité. La configuration 7 (C7), qui comporte des brèches horizontales concentrées de hauteur augmentée (C7) séparant la toiture des gradins, induit globalement un accroissement de la ventilation au niveau des gradins d'environ 80% par rapport à la configuration 4 (C4) où les brèches sont fermées. **L'augmentation de la hauteur des brèches, donc l'augmentation du taux de la porosité de façade conduit à "irrigation" plus intensive des tribunes, en particulier au niveau de la partie haute, à l'endroit où l'écoulement rentre dans le stade** [Szucs *et al.*, 2005(2)].

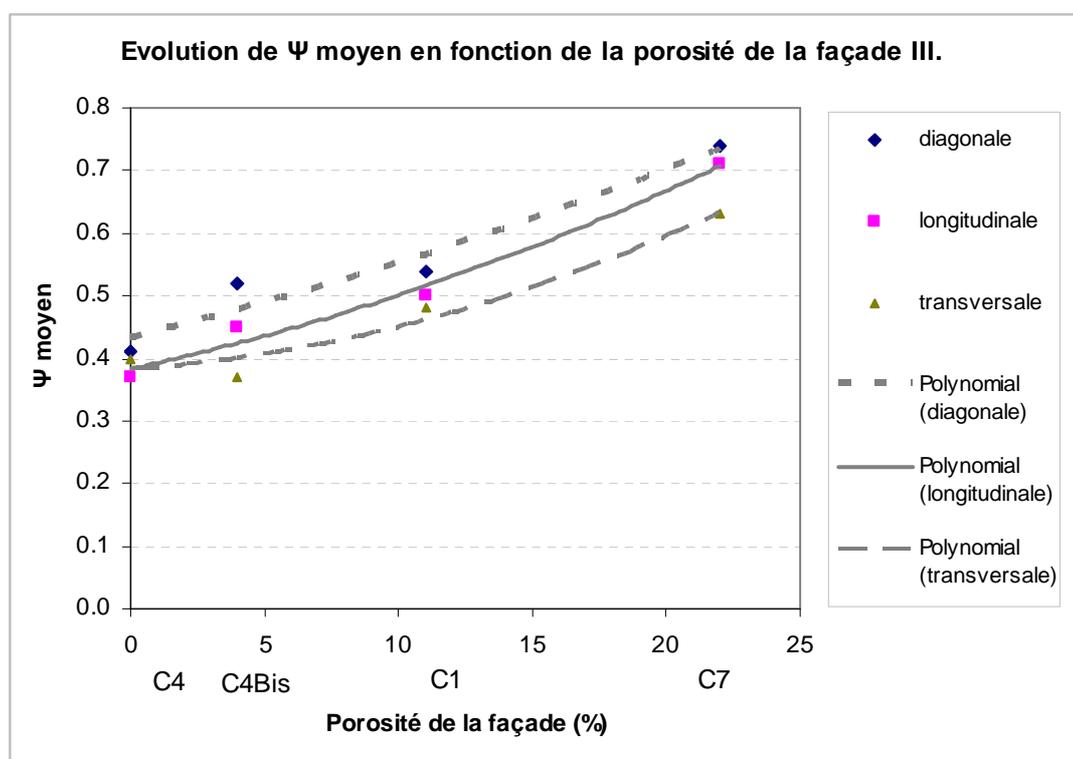


Figure 94 : Evolution des valeurs de $\bar{\Psi}$ en fonction de la porosité de la façade constituée des brèches horizontales concentrées

La configuration 4Bis (C4Bis) qui possède des brèches ouvertes à l'exception des virages semble avoir une capacité protectrice légèrement plus importante que la configuration 1 (C1) qui comporte une brèche périphérique continue entre la toiture et des tribunes. Évidemment, les valeurs de $\bar{\Psi}$ les moins élevées appartiennent à la configuration 4 (C4) où la façade est complètement fermée : elles se trouvent autour de 0.4, ce qui signifie une capacité protectrice relativement élevée parmi les configuration étudiées.

Le Figure 95 montre que les valeurs de $\Psi_{10\%}$ ont une sensibilité moins importante à la variation de ce type de porosité que les valeurs de $\bar{\Psi}$. Les différences entre les valeurs des configurations 1 (C1), 4 (C4) et 4Bis ne sont pas importantes. Ceci indique que dans les zones moins ventilées de ces trois configurations les vitesses du vent auxquelles des spectateurs sont exposés sont approximativement identiques. Cependant, la configuration 7 (C7) qui comporte une brèche de hauteur augmentée réhausse le niveau minimal de ventilation d'environ 40%.

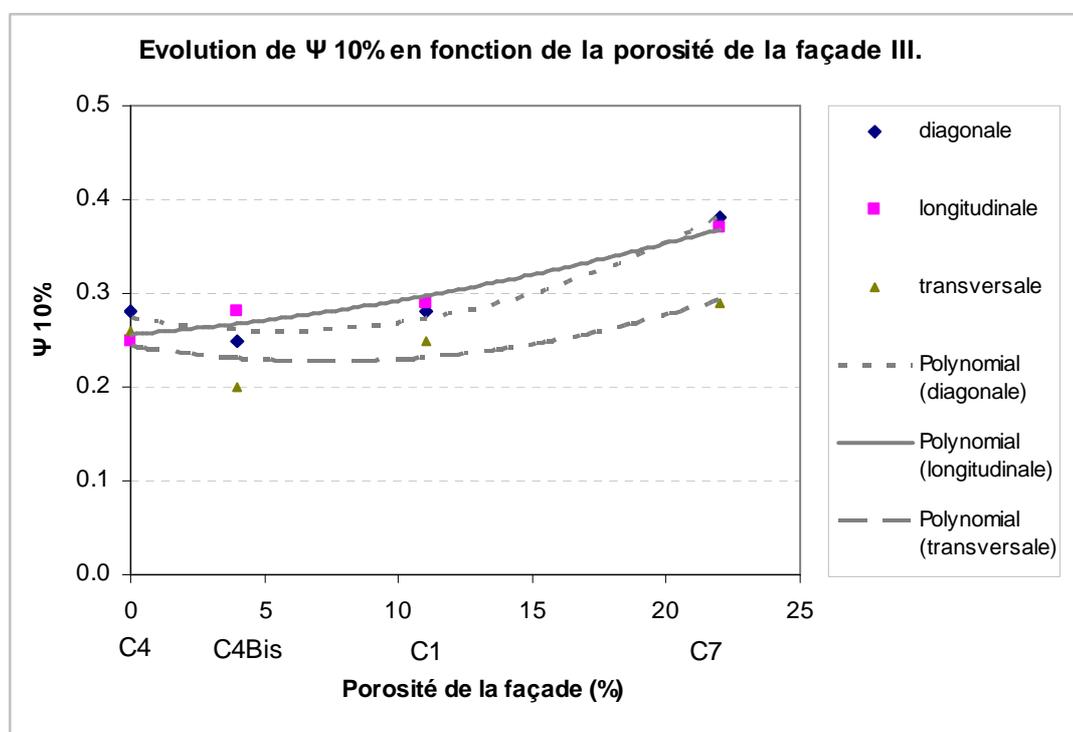


Figure 95 : Valeurs de $\Psi_{10\%}$ en fonction de la porosité de la façade

La Figure 96 illustre l'évolution des valeurs de $\Psi_{90\%}$ en fonction de la porosité de la façade. Entre toutes les valeurs caractéristiques de Ψ , les $\Psi_{90\%}$ présentent la plus forte sensibilité à la variation de porosité constituée des brèches horizontales concentrées. Cela est indiqué par la pente importante des courbes de tendances sur la Figure 96.

La différence entre les valeurs de $\Psi_{90\%}$ pour les configurations de ce groupe de porosité, est importante : pour les incidences longitudinales et transversales, les spectateurs sont exposés à une vitesse deux fois plus élevée dans un stade où la hauteur entre la toiture et des tribunes est deux fois plus importante (C7) par

rapport à la première et la quatrième configuration (C1, C4). Pour l'incidence diagonale le facteur de multiplication est légèrement réduit : environ 1.6.

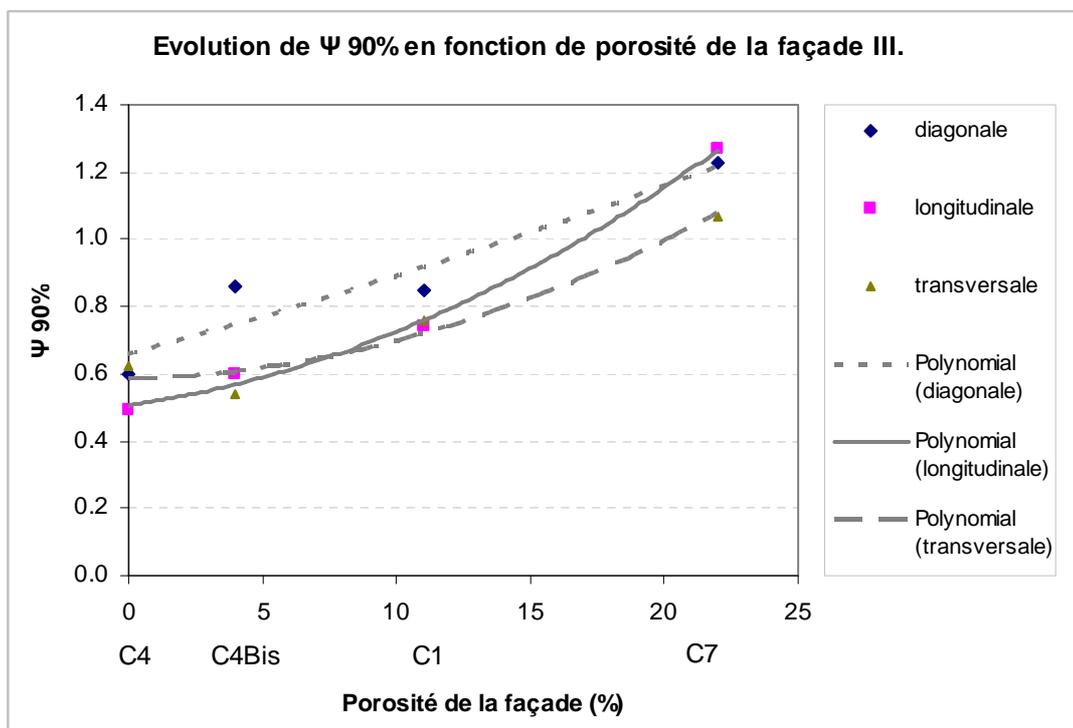


Figure 96 : Les valeurs de $\Psi_{90\%}$ en fonction de la porosité de la façade

La Figure 97 illustre les indices d'homogénéité IH10% et IH90% en fonction de la variation de la porosité de façade. Ce type de porosité semble affecter l'homogénéité de l'écoulement.

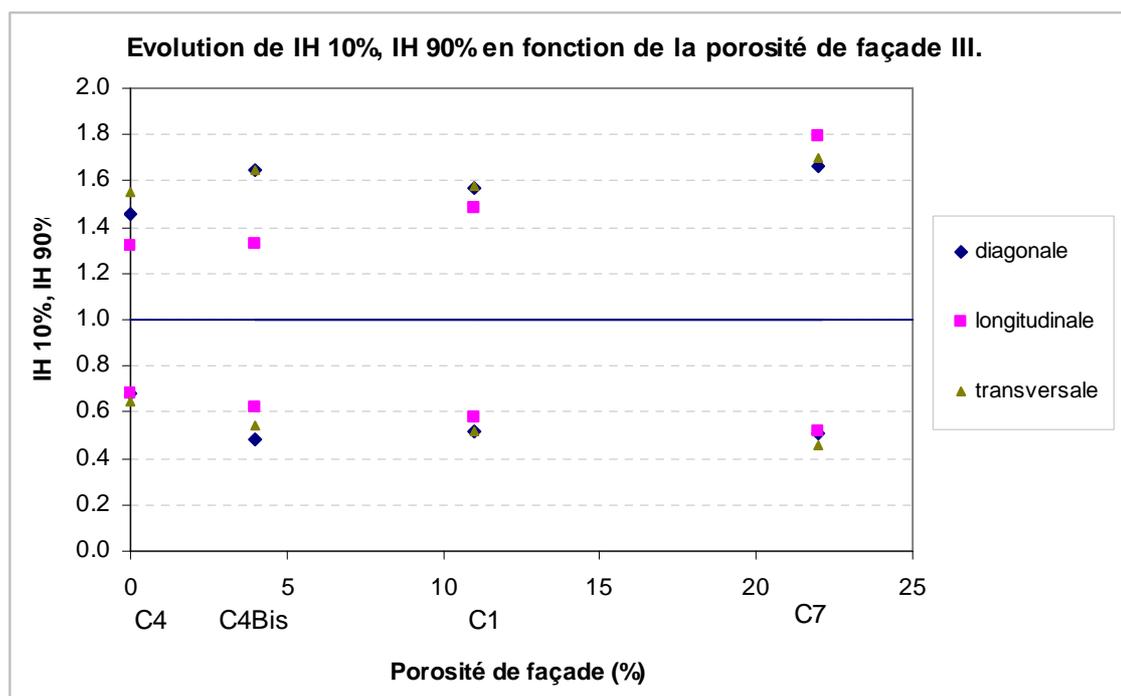


Figure 97 : Valeurs de IH 10% de IH 90% en fonction de la porosité de la façade

Les indices IH 10% et IH 90% mettent en évidence que plus le taux de porosité constituée de brèches horizontales concentrées, est important, plus l'écoulement est hétérogène, donc les valeurs des indices sont le plus éloignées de la valeur 1.

La Figure 98 illustre la variation de l'aire des zones concernées par les valeurs de $\Psi_{10\%}$, $\bar{\Psi}$ et de $\Psi_{90\%}$ par rapport à la surface totale des tribunes et pour les trois incidences du vent. La croissance de la porosité de la façade ne génère pas forcément d'augmentation de l'aire des zones ventilées (zones concernées par le $\Psi_{90\%}$) et la décroissance de la porosité n'entraîne pas forcément la décroissance de l'aire de zones moins ventilées (zones concernées par le $\Psi_{10\%}$). L'étendue de ces zones varie en fonction de l'incidence du vent.

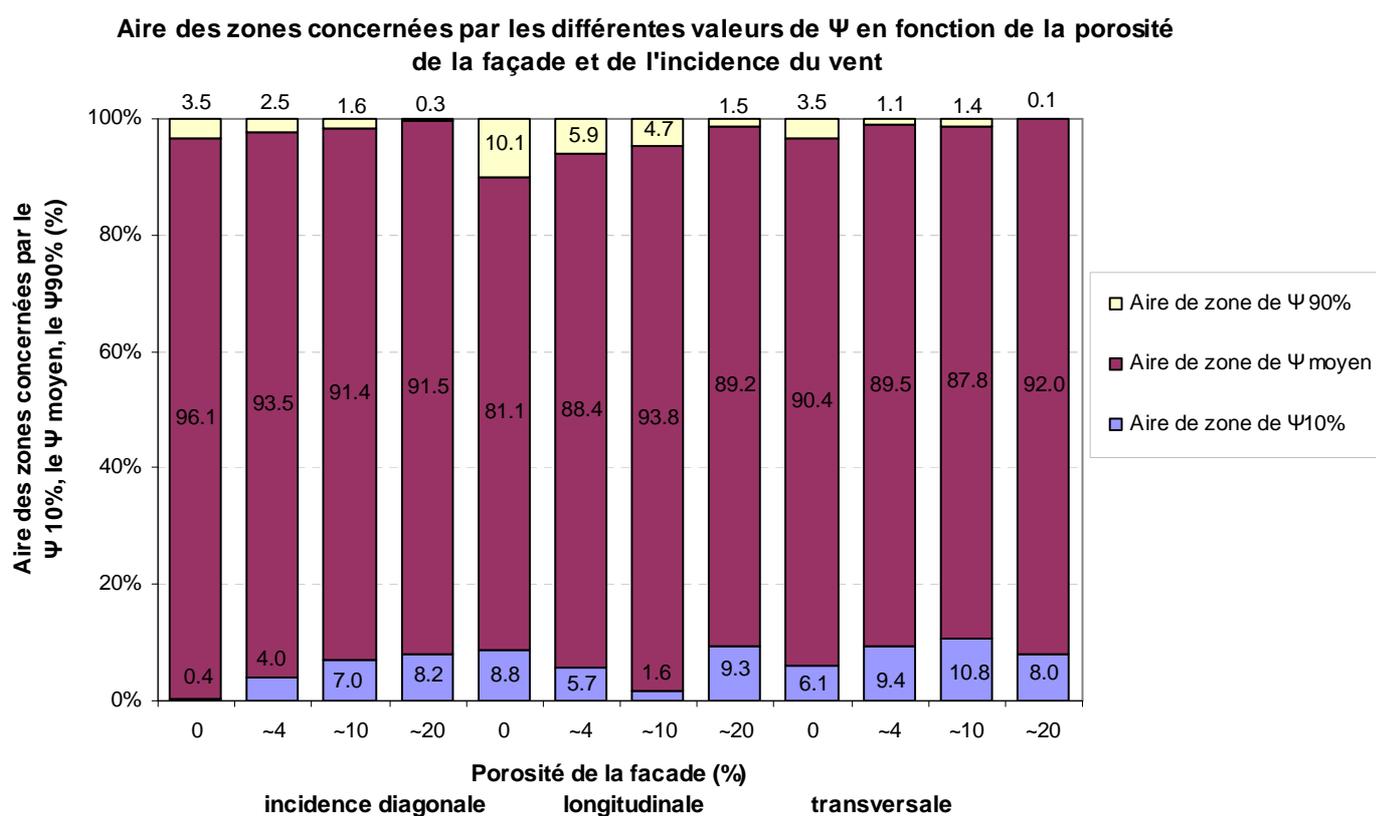
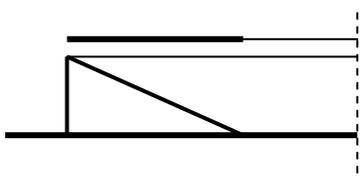
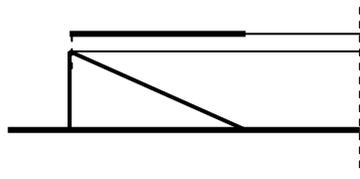
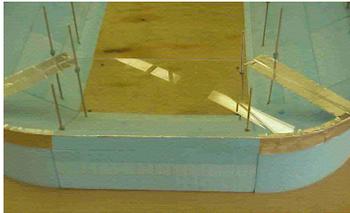
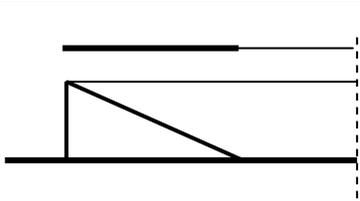
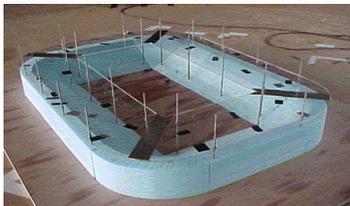
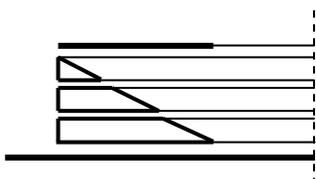
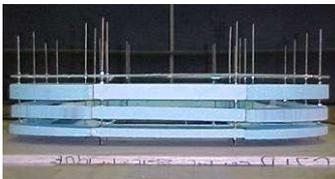
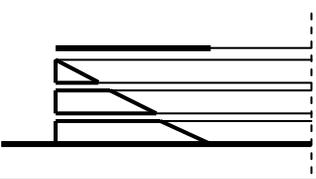


Figure 98 : Aire des zones concernées par le $\Psi_{10\%}$, le $\bar{\Psi}$ et le $\Psi_{90\%}$ en fonction de la porosité de la façade et de l'incidence du vent

2.1.4 Quatrième groupe de porosité des configurations : Ensemble des brèches horizontales et verticales uniformément réparties et brèches horizontales concentrées

Le quatrième groupe de porosité se compose des configurations comportant des brèches horizontales concentrées localisées entre la toiture et les gradins et des brèches périphériques horizontales et verticales uniformément réparties, sur toute la surface de la façade. Les brèches horizontales concentrées et les brèches verticales étudiées sont ouvertes, tandis que les brèches horizontales uniformément réparties sont soit

couvertes, soit non couvertes par des écrans brise-vent. Neuf configurations appartiennent à ce groupe : la configuration 1 (C1), 4Bis (C4Bis), 7 (C7), 8 (C8), 9 (C9), 10 (C10), 16 (C16), 18 (C18) et 19 (C19). Elles sont comparées au cas de "référence de porosité", à la configuration 4 (C4) qui comporte une façade de 0% de porosité, en d'autres termes une façade complètement fermée. Le Tableau 15 illustre l'ensemble de ces configurations.

C1 – TOITURE HORIZONTALE		
		Porosité \approx 10%
C4 BIS – BRECHE HORIZONTALE FERMEE AUX ANGLES MAIS OUVERT SUR LA PERIPHERIE		
		Porosité \approx 4%
C7 – FACADE DIVISEE PAR DES BRECHES VERTICALES UNIFORMEMENT REPARTIES		
		Porosité \approx 20%
C8 – FACADE DIVISEE PAR 4 BRECHES HORIZONTALES		
		Porosité \approx 40%
C9 – FACADE DIVISEE PAR 3 BRECHES HORIZONTALES		
		Porosité \approx 30%

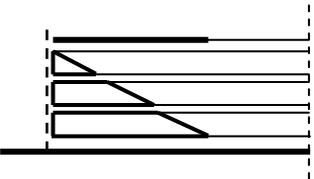
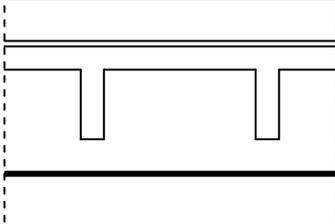
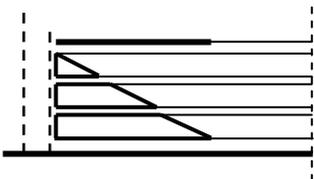
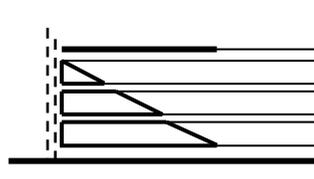
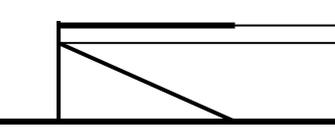
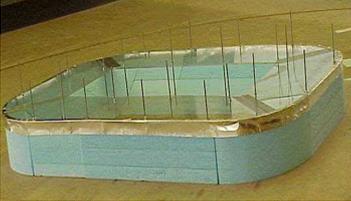
C10 – FACADE DIVISEE PAR 4 BRECHES HORIZONET COUVERTE PAR UNE GRILLE DE POROSITE A 50%		
		Porosité ≈ 20%
C16 – FACADE DIVISEE PAR DES BRECHES VERTICALES UNIFORMEMENT REPARTIES		
		Porosité ≈ 16%
C18 – UNE VARIANT DE C10 : FAÇADE COUVERTE PAR DEUX GRILLES ELOIGNEES SUPERPOSEES DE POROSITE A 50%		
		Porosité ≈ 10%
C19 – UNE VARIANT DE C10 : FAÇADE COUVERTE PAR DEUX GRILLES METALLIQUES SUPERPOSEES DE POROSITE A 50%		
		Porosité ≈ 10%
C4 – FACADE FERMEE (SANS BRECHES)		
		Porosité =0%

Tableau 15 : Quatrième groupe des configurations : brèches horizontales régulièrement réparties et concentrées, et brèches verticales régulièrement réparties.

La Figure 99 illustre l'évolution des valeurs de $\bar{\Psi}$ en fonction de la porosité de la façade pour ces dix configurations. **La croissance du taux de porosité entraîne une augmentation des valeurs de $\bar{\Psi}$, indépendamment de la localisation des brèches [Szucs et al., 2005(2)].** La figure montre que **l'insertion des brèches horizontales régulièrement réparties et de brèches concentrées de hauteur augmentée entre la toiture et les tribunes, font significativement croître la ventilation au niveau des tribunes.** Elle

montre également que la configuration 18 (C18), qui est une variante de la configuration 10 (C10) et comporte deux écrans brise-vent éloignés l'un de l'autre, de porosité à 50% donne des valeurs de $\bar{\Psi}$ à peu près identiques à la configuration 4 (C4).

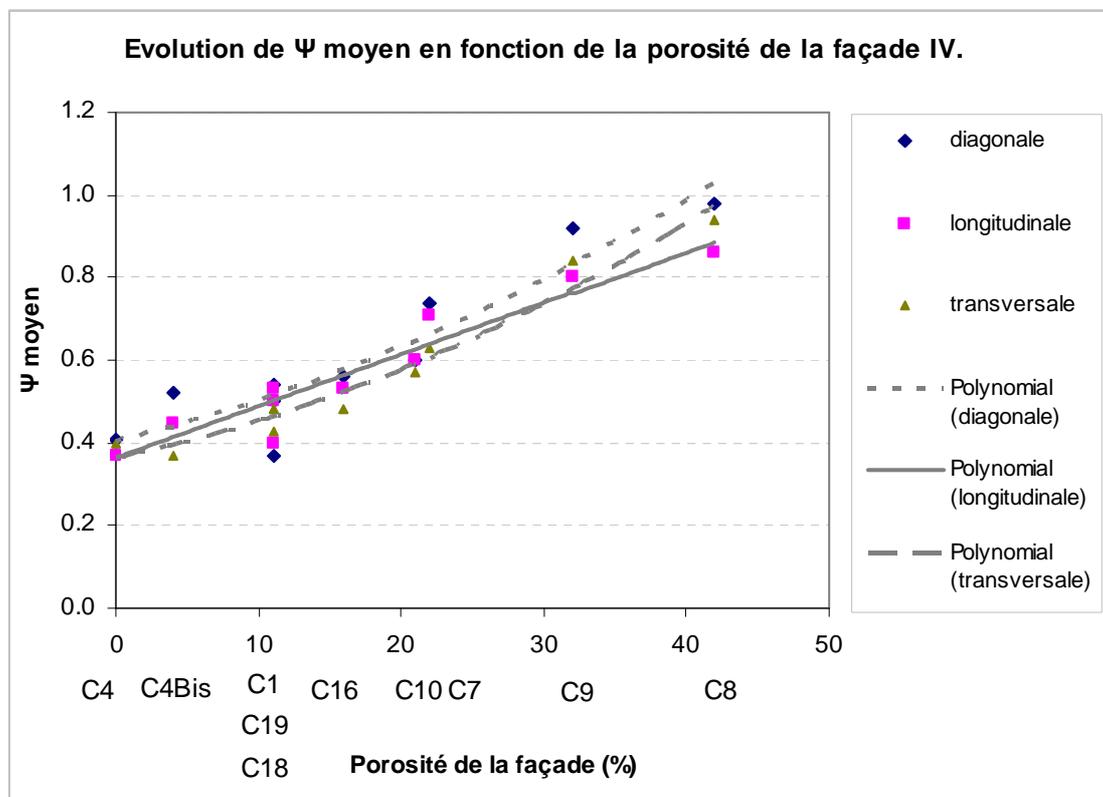


Figure 99 : Evolution des valeurs de $\bar{\Psi}$ en fonction de la porosité de la façade

La Figure 99 illustre également, que les valeurs de $\bar{\Psi}$ ne montrent pratiquement pas de sensibilité à l'incidence du vent.

Figure 100 illustre la variation des valeurs de $\Psi_{10\%}$ en fonction de la porosité de la façade. Semblablement aux valeurs de $\bar{\Psi}$, les valeurs de $\Psi_{10\%}$ augmentent également avec la croissance du taux de porosité. Les valeurs les plus importantes appartiennent à la configuration 8 (C8), où les spectateurs sont exposés à des vitesses environ deux fois supérieures à celles de la configuration 4 (C4) dans les zones les moins ventilées.

Certaines configurations, notamment la configuration 18 (C18) et 4Bis (4Bis) entraînent des valeurs de $\Psi_{10\%}$ qui sont inférieures à celles de la configuration 4 (C4). Ceci indique, que **pour certaines incidences de vent une configuration avec des brèches horizontales régulièrement réparties et couvertes par deux écrans brise-vent superposés et éloignés (C18) peut avoir une capacité protectrice plus accentuée qu'une configuration qui comporte une façade fermée (C4)**. La dépression interne est réduite par l'emploi des écrans brise-vent et en conséquence les effets de recirculation induits sont donc amoindris.

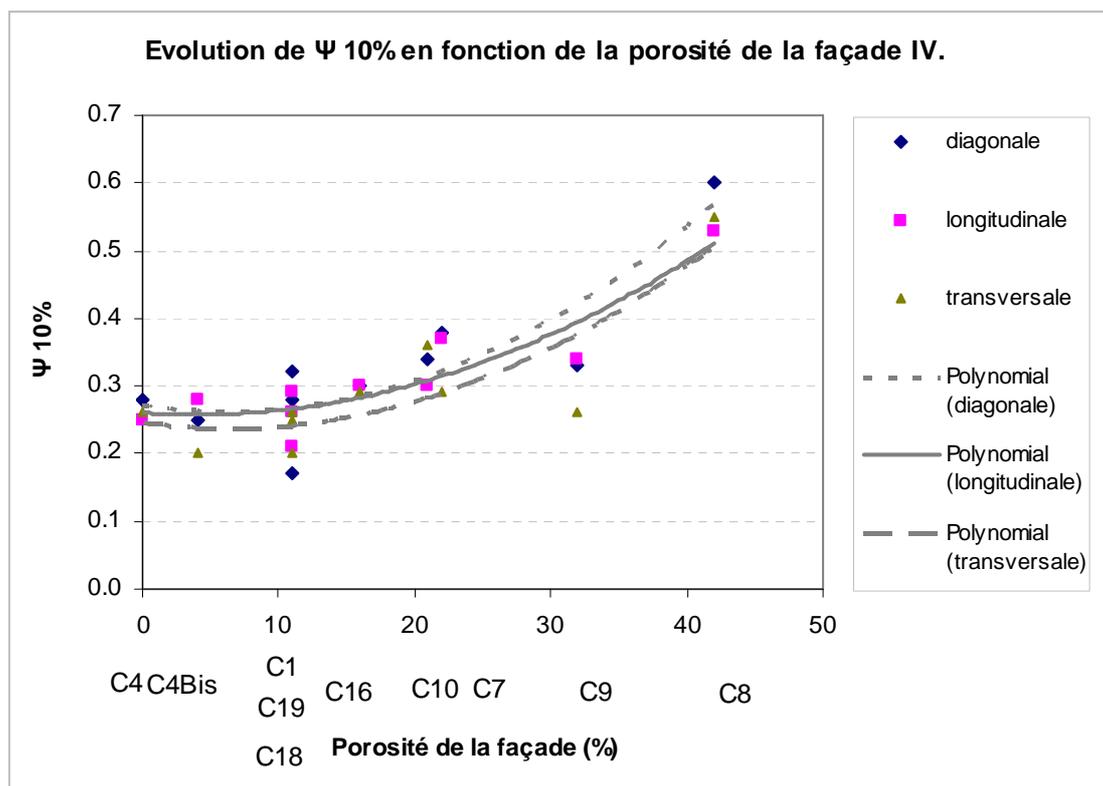


Figure 100 : Evolution des valeurs de $\Psi_{10\%}$ en fonction de la porosité de la façade

La Figure 101 illustre l'évolution des valeurs $\Psi_{90\%}$ en fonction de la porosité de la façade. Elles semblent également corrélées à la porosité de la façade.

Certaines configurations, en particulier la configuration 8 (C8) et la configuration 9 (C9) possèdent des valeurs de $\Psi_{90\%}$ très élevées par rapport à la configuration 4 (C4). Ces valeurs très élevées apparaissent dans les zones qui se situent face au vent, à l'environnement direct des brèches horizontales. Dans ces endroits l'écoulement rentre forme de jets d'air en impliquant des accélérations locales.

La configuration 7 (C7) présente également des valeurs importantes.

La pente des courbes de tendance montre que les valeurs de $\Psi_{90\%}$ sont plus sensibles à la variation de la porosité de la façade, que les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et de $\bar{\Psi}$.

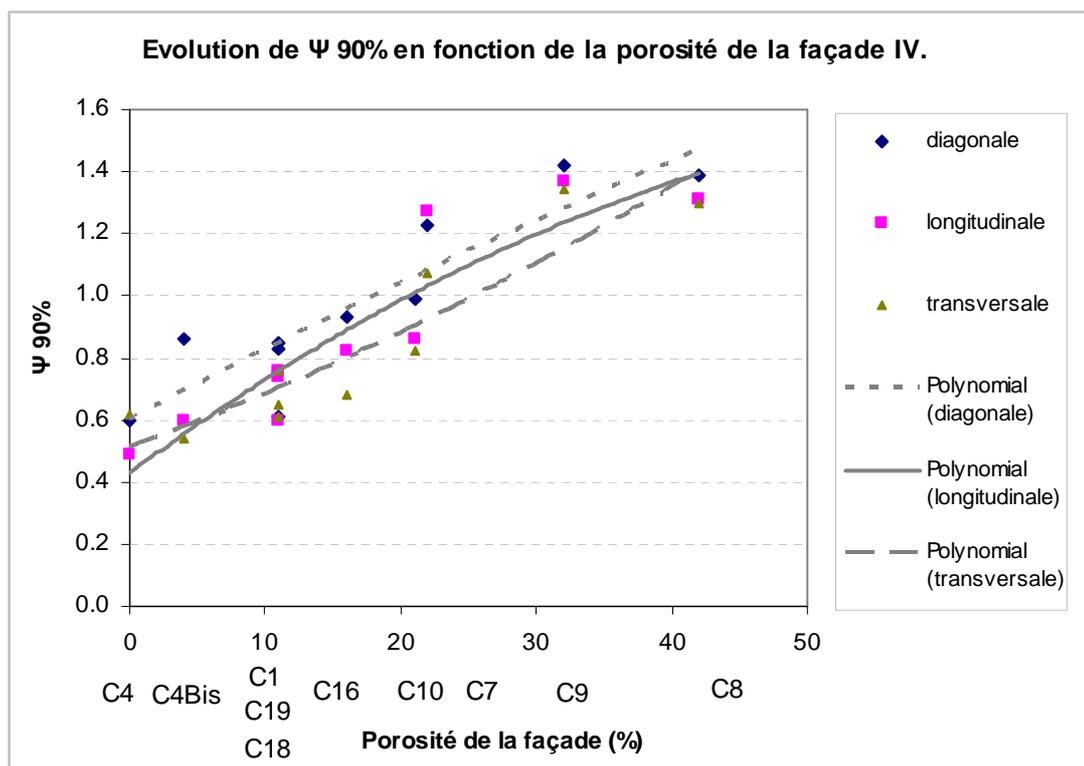


Figure 101 : Evolution des valeurs de $\Psi_{90\%}$ en fonction de la porosité de la façade

Les valeurs des indices d'homogénéité IH 10% et IH 90% sont représentées par la Figure 102 en fonction de la porosité de la façade.

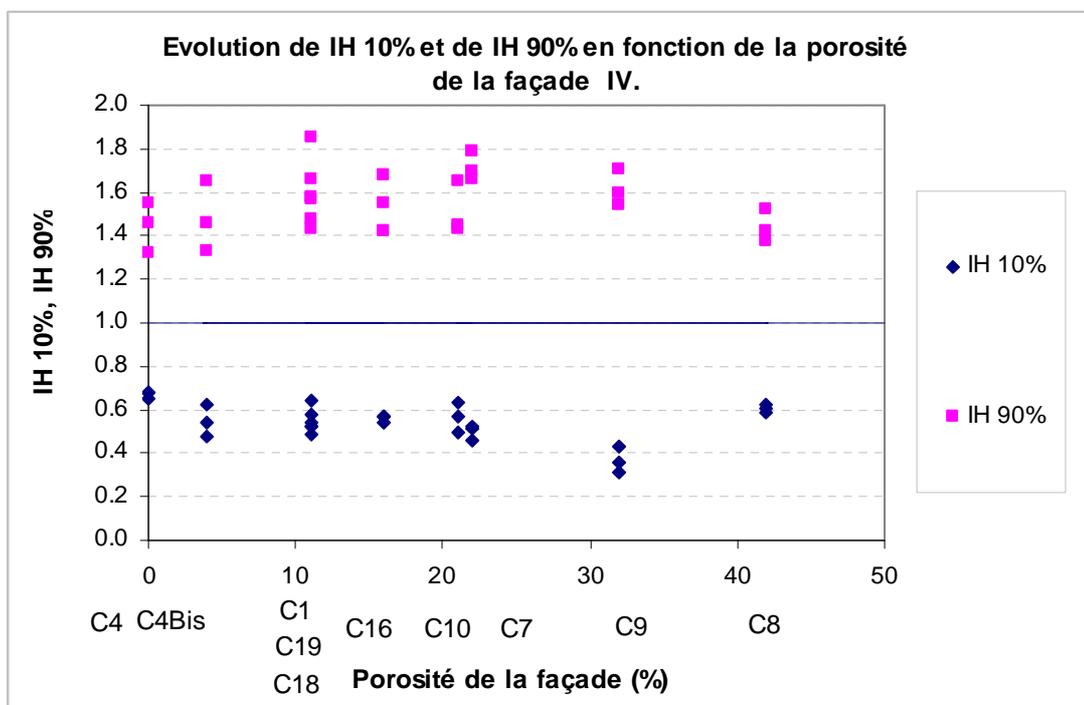


Figure 102 : Les valeurs de $IH_{90\%}$ et de $IH_{10\%}$ en fonction de la porosité de la façade. Les trois points appartenant à une configuration correspondent aux trois incidences du vent.

Les indices IH90% marquent un écoulement légèrement plus homogène pour les configurations de porosité 0% (C4) ou proche de 0% (C4Bis) et pour celles de porosité très élevée et régulièrement répartie, notamment pour la C8, C10 et C16.

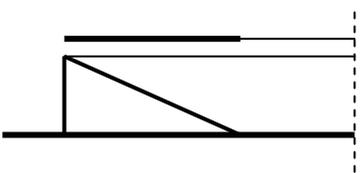
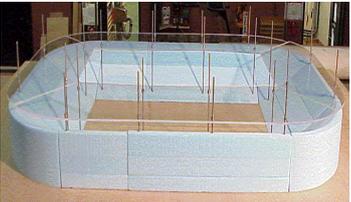
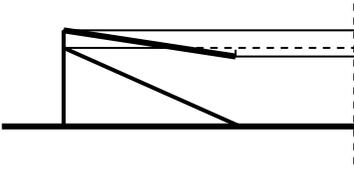
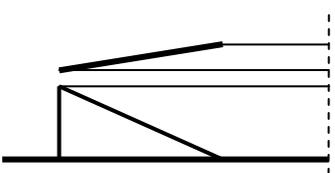
Les valeurs de l'indice IH 10% ne varient pas significativement avec la variation de porosité.

2.2 EFFET DE L'INCLINAISON DE LA TOITURE

L'inclinaison de toiture semble modifier significativement les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes. Quatre configurations de différentes inclinaisons de toiture ont été testées au cours des essais paramétriques :

- la configuration 1 (C1) avec une toiture horizontale qui couvre les tribunes en entier;
- la configuration 2 (C2) qui comporte une toiture descendante vers l'aire de jeu à 15°;
- la configuration 3 (C3) qui comporte une toiture montante vers l'aire de jeu à 15°;
- la configuration 11 (C11) avec une toiture montante vers l'aire de jeu, mais avec une plus forte inclinaison, à 30°.

Le Tableau 16 illustre ces configurations.

C1 – TOITURE HORIZONTALE		
		Inclinaison de toiture :0°
C2 – TOITURE DESCENDANT VERS L'AIRE DE JEU A 15°		
		Inclinaison de toiture :-15°
C3 – TOITURE MONTANTE VERS L'AIRE DE JEU A 15°		
		Inclinaison de toiture :+15°

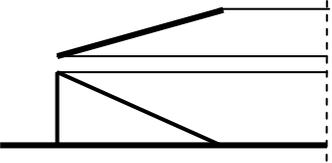
C11 – TOITURE MONTANTE VERS L'AIRE DE JEU A 30°		
		Inclinaison de toiture : +30°

Tableau 16 : Groupe des configurations de différentes inclinaisons de toiture

La Figure 103 illustre les valeurs de $\bar{\Psi}$ en fonction de l'inclinaison de toiture. **Une toiture descendant vers l'aire de jeu à 15° (C2) suscite globalement une ventilation plus intensive au niveau des tribunes, qu'une toiture horizontale (C1)** [Szucs *et al.*, 2005(1) ; [Szucs, 2004(1)].

Parmi les configurations de ce groupe, c'est la configuration 2 (C2) qui accroît dans la plus large mesure la ventilation. De plus, elle est la moins sensible à l'incidence du vent, ce qui est signifié par des valeurs de $\bar{\Psi}$ proches les unes des autres.

La configuration 1 (C1), comme la configuration précédente, montre une sensibilité faible à l'incidence du vent. Cependant, les configurations comportant des toitures montantes vers l'aire de jeu (C3, C11) sont plus sensibles à l'incidence : les valeurs obtenues pour la direction diagonale sont plus élevées que celles des directions longitudinales et transversales.

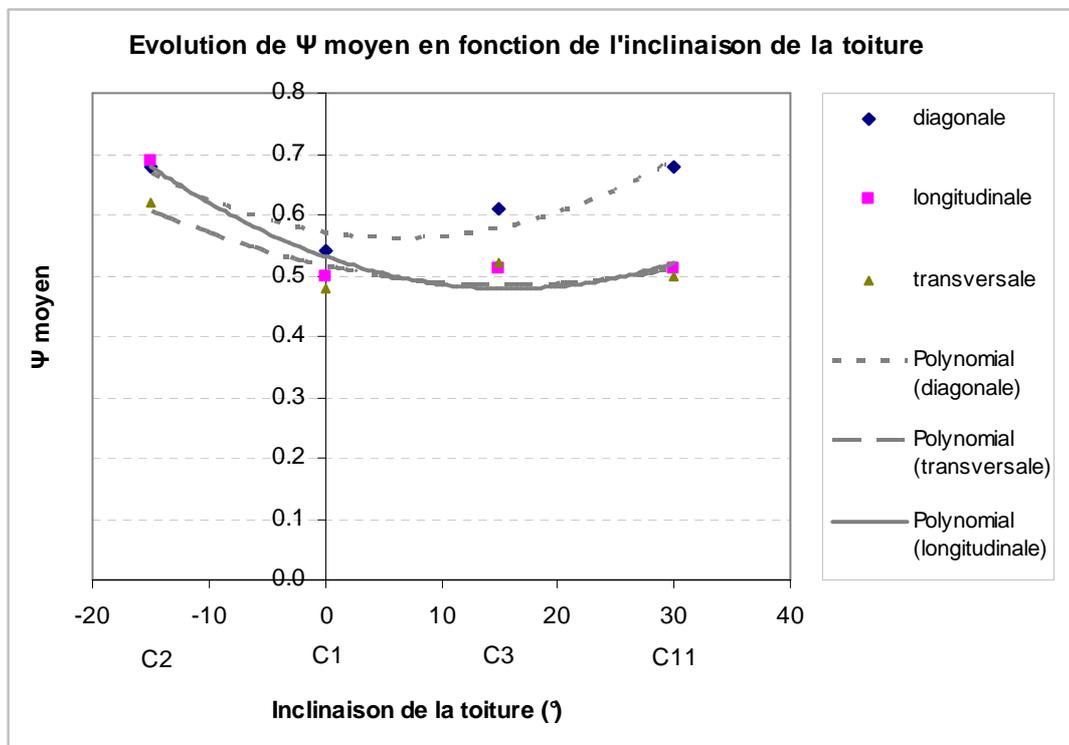


Figure 103 : Evolution des valeurs de $\bar{\Psi}$ en fonction de l'inclinaison de la toiture

Les courbes de tendance indiquent les minima locaux pour les incidences longitudinale et transversale dans l'intervalle de +5 à +20° de l'inclinaison, alors que pour l'incidence diagonale dans la proximité de l'inclinaison qui équivaut à 0.

La Figure 104 montre des valeurs de $\Psi_{10\%}$ en fonction de l'inclinaison de la toiture.

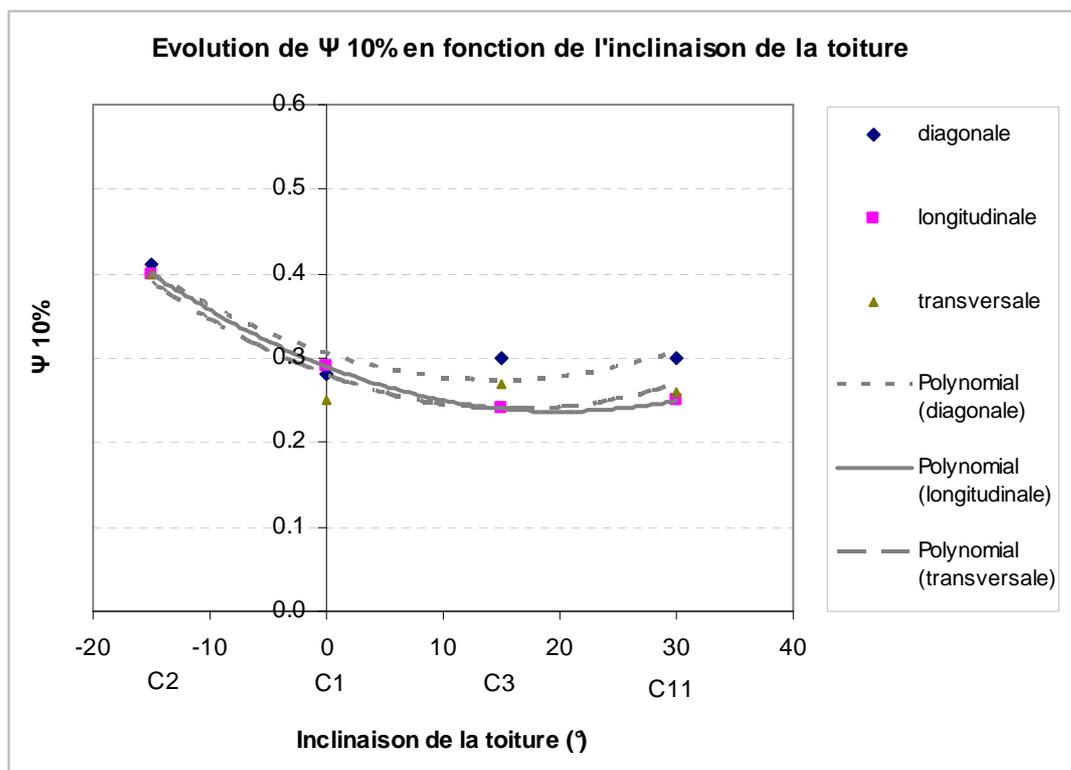


Figure 104 : Evolution des valeurs de $\Psi_{10\%}$ en fonction de l'inclinaison de la toiture

Les courbes de tendances sur la Figure 104 illustrent que la toiture descendant vers l'aire de jeu (C2) augmente les valeurs de $\Psi_{10\%}$ par rapport à la configuration qui comporte une toiture horizontale (C1). Cependant les configurations avec des toitures montantes (C3, C11) aux valeurs identiques et inférieures de celles correspondant à la configuration 1 (C1). Ceci indique, que un stade avec une toiture descendante vers l'aire de jeu implique de ventilation forte, même dans les zones les moins ventées. Ce phénomène est dû à l'effet collecteur de la toiture descendante : l'écoulement conduit entre les tribunes et la toiture passe par une section réduite (par rapport à la toiture montante ou horizontale) et implique de l'accélération au niveau de l'aire de jeu.

Les valeurs de $\Psi_{10\%}$ montrent peu de sensibilité à l'incidence du vent.

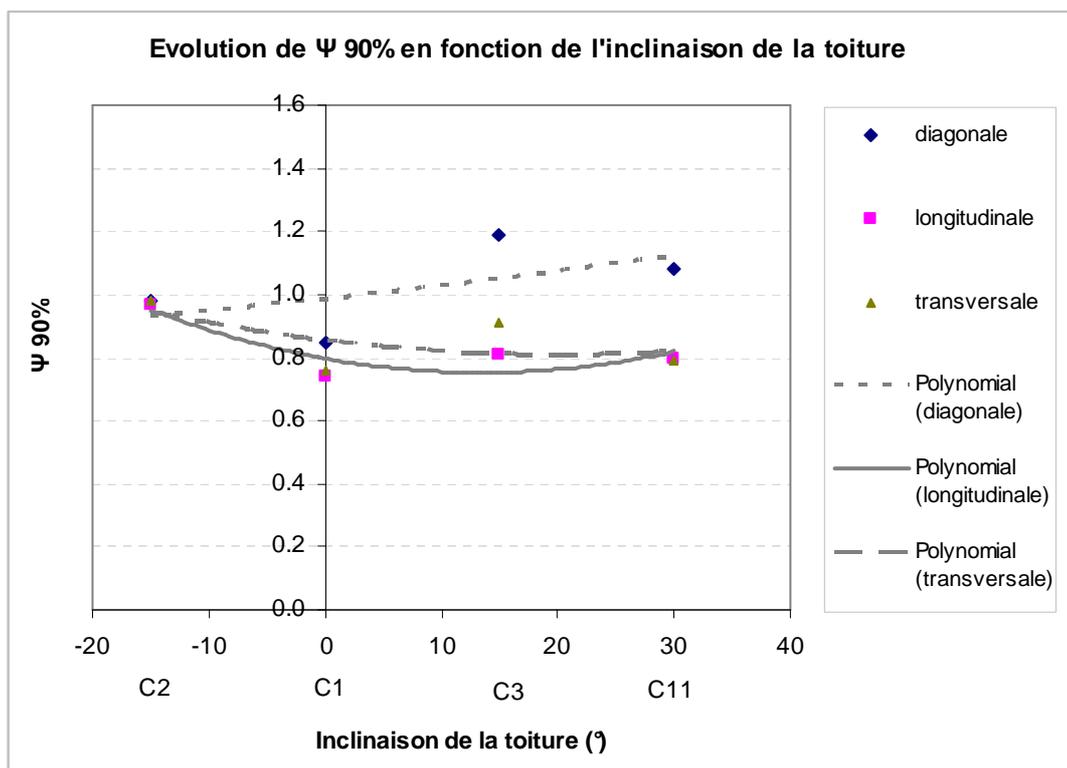


Figure 105 : Ajustement d'une loi polynomiale entre les valeurs de $\Psi_{90\%}$ et l'inclinaison de la toiture

La Figure 105 illustre la variation des valeurs de $\Psi_{90\%}$ en fonction de l'inclinaison de toiture. Les valeurs de $\Psi_{90\%}$ sont également plus élevées pour la configuration 2 (C2) dont la toiture descend vers l'aire de jeu et implique une section réduite entre les gradins et la toiture. Cette section réduite facilite le guidage du flux et provoque son accélération au niveau de l'intégralité des tribunes.

Les valeurs de $\Psi_{90\%}$ correspondant à la configuration 1 (C1) sont diminuées d'un facteur d'environ 0.8 par rapport à celles correspondant à la configuration 2 (C2). Ces deux configurations ne montrent pas de sensibilité importante à l'incidence du vent. Cependant, les configurations comportent des toitures montantes (C3, C11) sont sensibles à l'incidence : les valeurs de $\Psi_{90\%}$ appartenant à la direction diagonale dépassent significativement celles correspondant aux autres directions. De plus elles dépassent toutes les valeurs mesurées pour les configurations 1 et 2 (C1, C2). Les valeurs très élevées de $\Psi_{90\%}$ pour les configurations qui comportent de toiture montante vers l'aire de jeu, et pour l'incidence diagonale peuvent être vraisemblablement dues au retombé du flux diagonal dans la cavité formée par le stade en deux vortex quasi coniques qui se développent le long des tribunes.

La Figure 106 illustre les indices d'homogénéité : IH 10% et IH 90%. Les courbes de tendance indiquent des relations entre ces indices et l'inclinaison de la toiture.

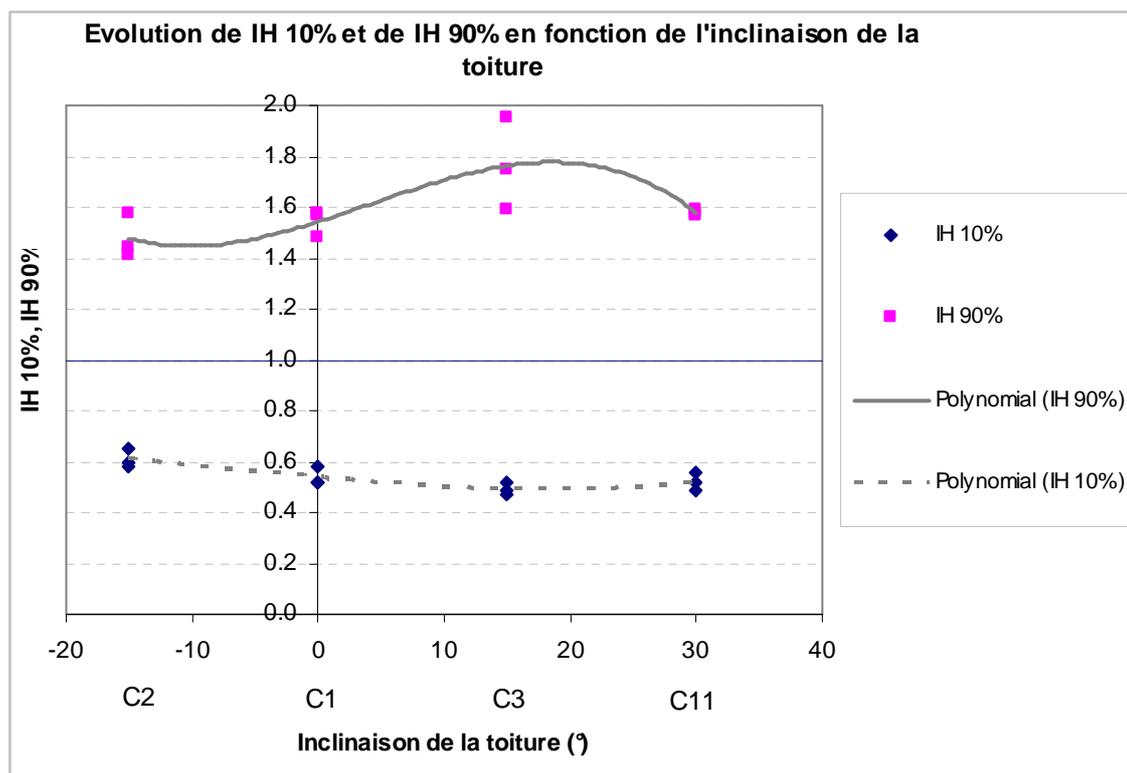


Figure 106 : Ajustement d'une loi polynomiale entre les valeurs de IH 10%, de IH 90% et l'inclinaison de la toiture. Les trois valeurs de chaque configuration correspondent les trois incidences du vent pour lesquelles le stade a été étudié.

L'écoulement est le plus homogène dans les configurations où la toiture descend vers l'aire de jeu ou lorsqu'elle est horizontale, ce qui est indiqué par les deux sortes d'indices de homogénéité. Une toiture légèrement montante (C3) rend l'écoulement moins homogène et – concernant les indices IH 90% - plus sensible à l'incidence du vent. Cependant, une toiture montant d'un angle plus important (C11) implique un écoulement plus homogène et - du point de vu des indices IH 90% - moins sensible à l'incidence.

Les valeurs de IH 10% varient d'une manière identique à celles de IH 90%, mais avec des écarts moins importants.

La Figure 107 illustre les aire de zones concernées par le $\Psi_{10\%}$, le $\bar{\Psi}$ et le $\Psi_{90\%}$ en fonction de l'inclinaison de la toiture et de l'incidence du vent. Une toiture inclinée n'augmente pas forcément les aire des zones concernées par le $\Psi_{90\%}$ (zones ventées) et concernées par le $\Psi_{10\%}$ (zones moins ventées).

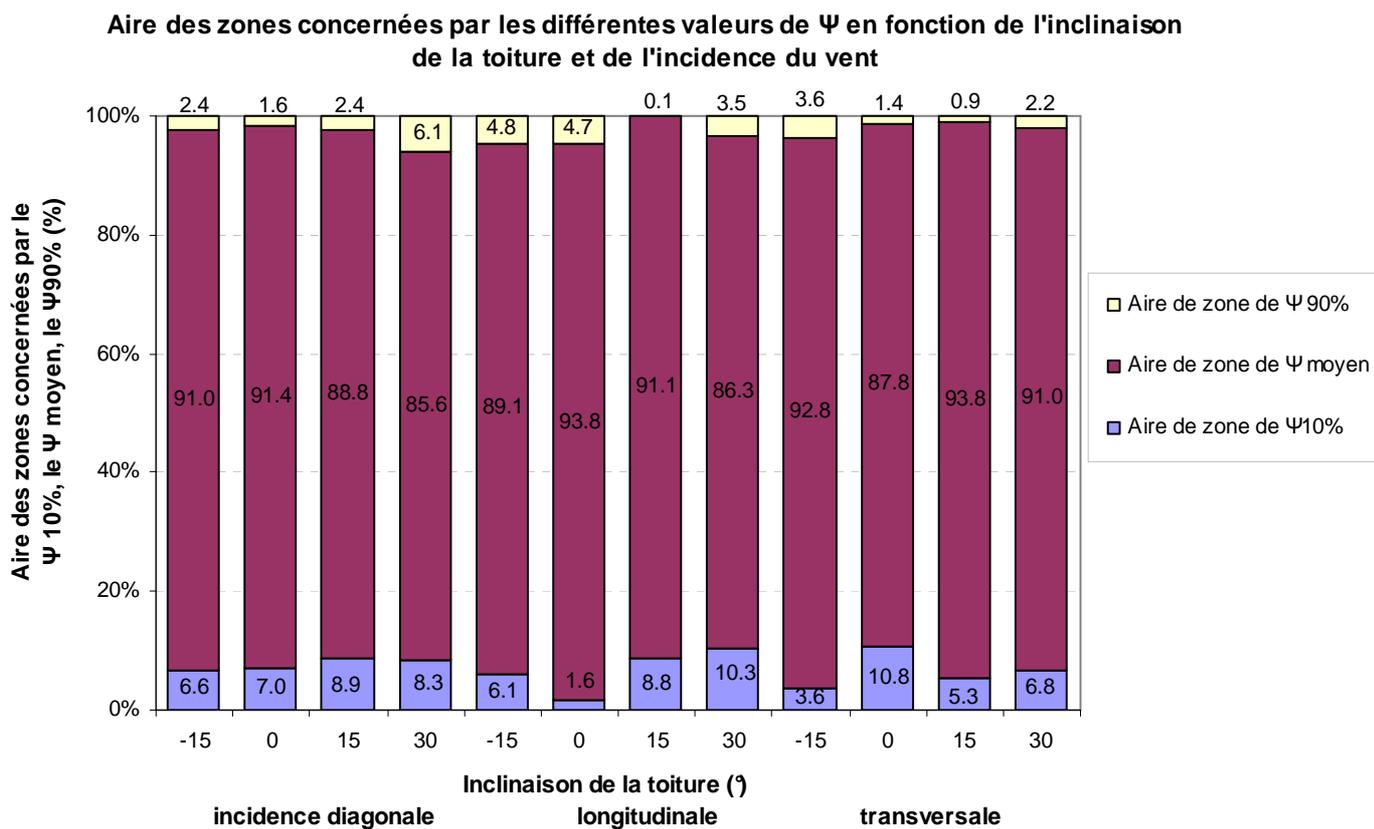


Figure 107 : Aire des zones concernées par le $\Psi_{10\%}$, le $\bar{\Psi}$ et le $\Psi_{90\%}$ en fonction de l'inclinaison de la toiture et de l'incidence du vent

2.3 EFFET DES DEBORDS DE TOITURE

La majorité des configurations étudiées au cours des essais paramétriques menés en soufflerie comportent une toiture qui couvre l'intégralité des tribunes. Le plan de toiture est identique à celui des tribunes. Cependant dans la réalité il existe des stades dont la toiture comporte un débord soit vers l'extérieur du stade, soit vers l'intérieur. Un débord vers l'intérieur signifie une ouverture centrale (oculus) de toiture réduite. C'est pourquoi les effets aérauliques de deux différents débords de toitures a été également étudié et comparés à celui-ci d'une toiture horizontale sans débord :

- Toiture horizontale débordant vers l'extérieur du stade;
- Toiture horizontale débordant vers l'intérieur du stade qui signifie un oculus réduit.

Le Tableau 17 illustre ces configurations.

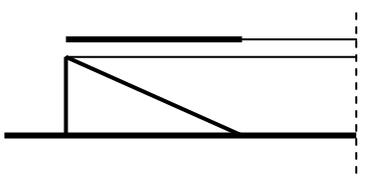
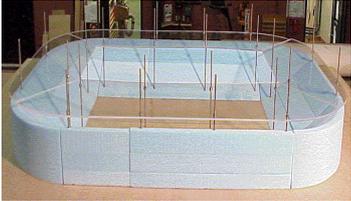
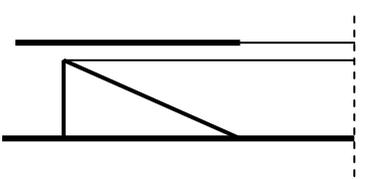
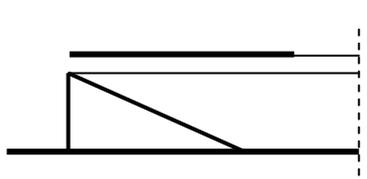
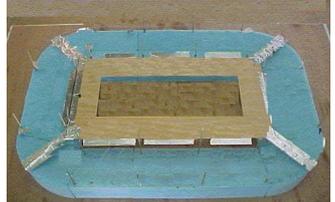
C1 – TOITURE HORIZONTALE		
		Débord de toiture : 0 mètre.
C5 – TOITURE DEBORDANT VERS L'EXTÉRIEUR		
		Débord de toiture : +20 mètres.
C6 – TOITURE D'OUVERTURE CENTRALE REDUITE (DEBORD VERS L'INTÉRIEUR)		
		Débord de toiture : -20 mètres.

Tableau 17 : Groupe des configurations de toiture débordante vers l'extérieur ou vers l'intérieur

La Figure 108 illustre la variation des valeurs de $\bar{\Psi}$ en fonction de l'existence d'un débord de toiture vers l'extérieur ou vers l'intérieur.

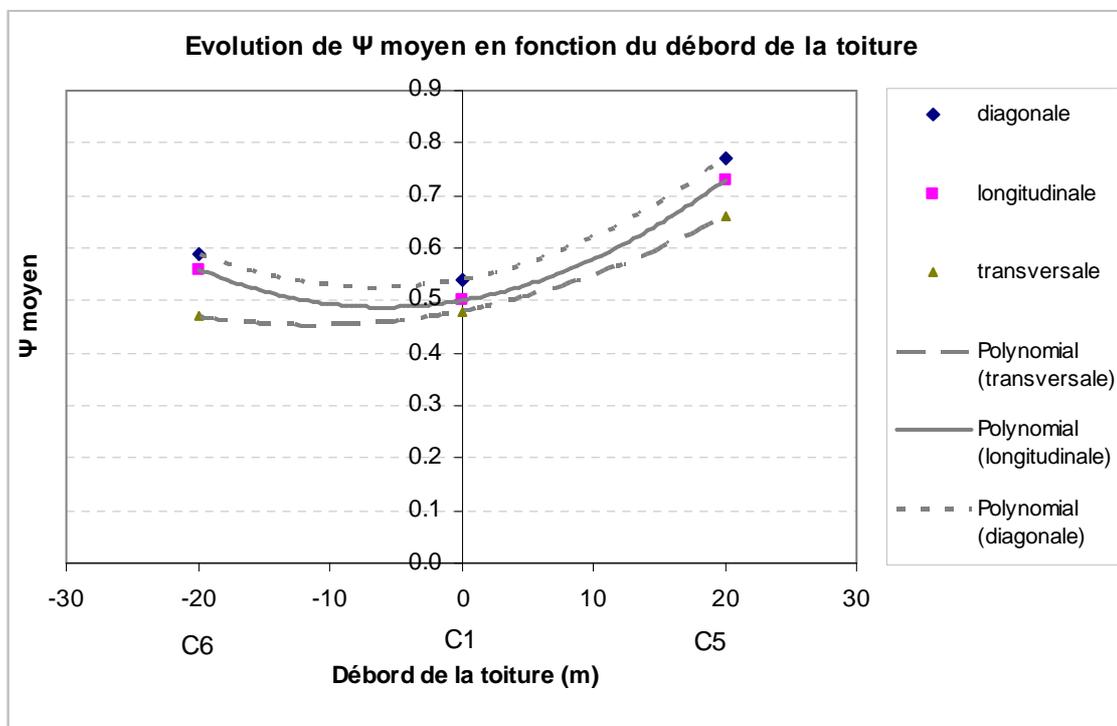


Figure 108 : Variation des valeurs de $\bar{\Psi}$ en fonction du débord de la toiture

Sur la Figure 108 un débord de 20 mètres vers l'extérieur est marqué par +20 mètres, tandis qu'un débord de toiture vers l'intérieur est marqué par -20 mètres. Ce dernier signifie également que la toiture a son ouverture centrale (oculus) réduite.

Les courbes de tendance montrent qu'une toiture débordant vers l'extérieur (C5) implique globalement l'augmentation des valeurs de $\bar{\Psi}$ d'un facteur environ 1.5, par rapport aux résultats de la toiture horizontale (C1). Cette augmentation est due à l'effet "collecteur" du débord, qui collecte l'écoulement pariétal ascendant et guide globalement l'écoulement dans la brèche horizontale entre la toiture et la tribune.

La Figure 108 montre également, qu'une **toiture d'oculus réduit n'implique pas forcément une ventilation plus faible qu'une toiture horizontale non débordante**. Pour les incidences diagonale et longitudinale la configuration qui comporte une toiture de l'oculus réduit conduit à une ventilation plus forte au niveau des tribunes qu'une toiture non débordante. Cependant, pour l'incidence transversale où la dimension de l'ouverture de la toiture est très réduite la retombée de l'écoulement et la recirculation de celui-ci dans la cavité formée par le stade, n'est pas importante. Ceci indique que la configuration de l'oculus réduit (C6) est sensible à l'incidence du vent.

Les valeurs de $\Psi_{10\%}$ semblent montrer une sensibilité moins importante à la variation du débord de toiture, que les $\bar{\Psi}$. Ceci est indiqué par la Figure 109.

Une toiture d'ouverture centrale réduite semble atténuer la ventilation dans les zones de calme par rapport à une toiture horizontale, tandis qu'un débord vers l'extérieur accélère l'écoulement dans ces zones [Szucs *et al.*, 2005(1)].

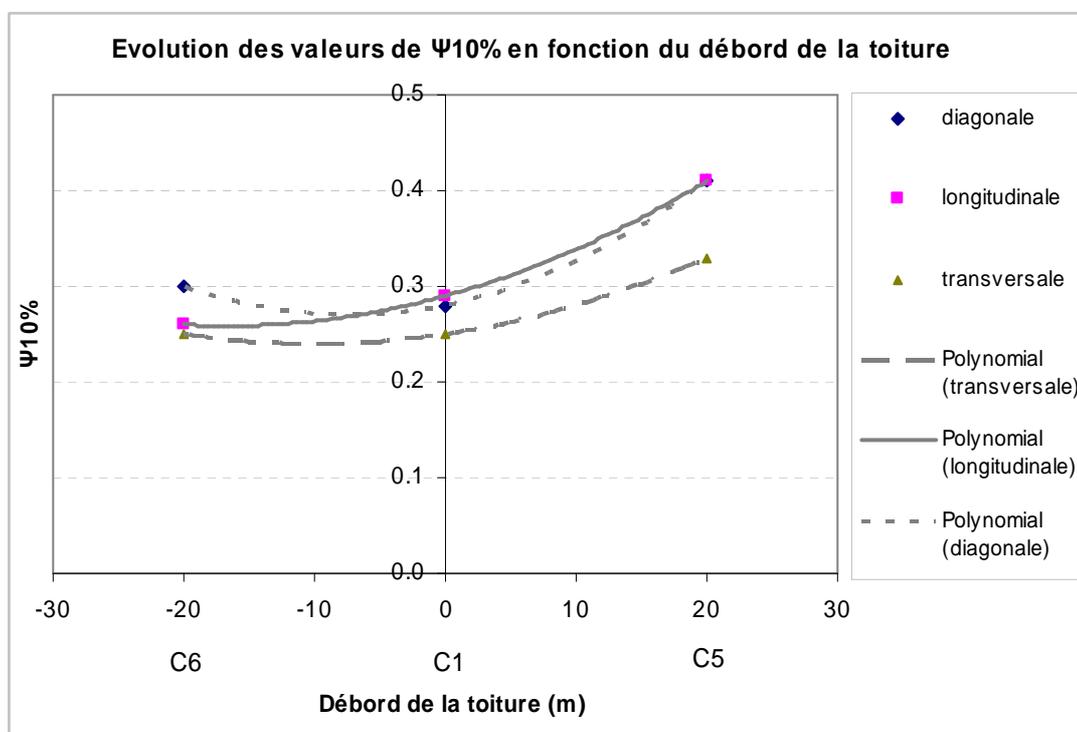


Figure 109 : Variation des valeurs de $\Psi_{10\%}$ en fonction du débord de la toiture

La Figure 110 illustre l'évolution des valeurs de $\Psi_{90\%}$ en fonction du débord de toiture. **Une toiture débordée vers l'extérieur (C5) augmente l'intensité de ventilation globalement au niveau des tribunes**, ceci est indiqué par les valeurs élevées de $\Psi_{90\%}$. Elles sont augmentées d'un facteur d'environ 1.5 par rapport à celles de la configuration 1 (C1), qui comporte une toiture horizontale et non débordante. **La configuration 6 (C6) qui possède une toiture d'ouverture centrale réduite intensifie également l'écoulement** par rapport à la configuration 1 (C1).

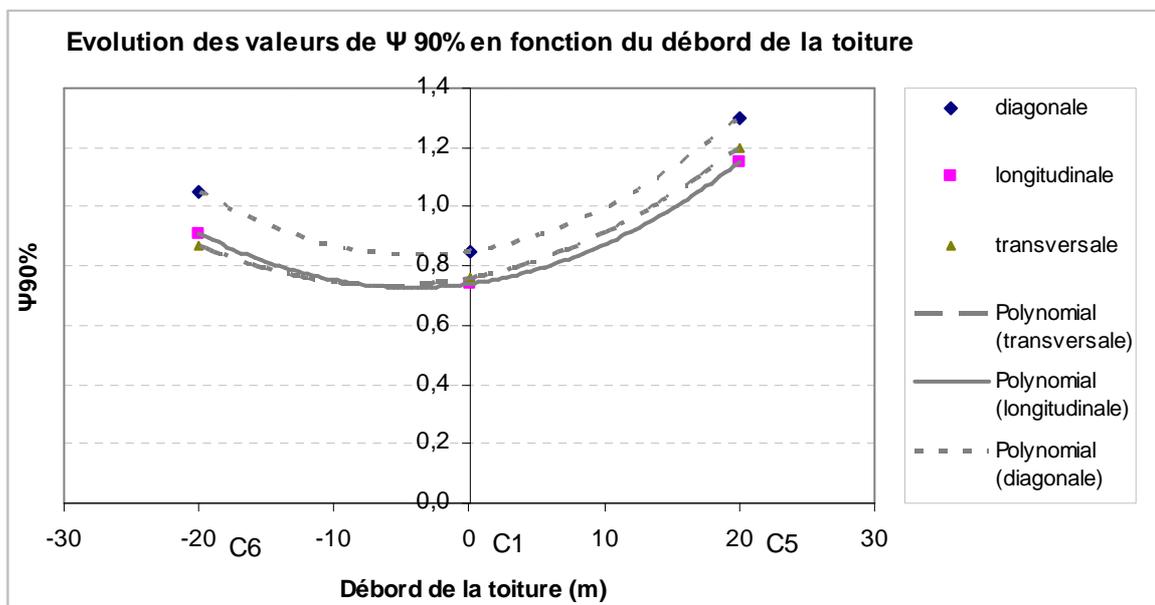


Figure 110 : Evolution des valeurs de $\Psi_{90\%}$ en fonction du débord de la toiture

La Figure 111 montre la variation des indices d'homogénéité IH 10% et IH 90% en fonction du débord de la toiture.

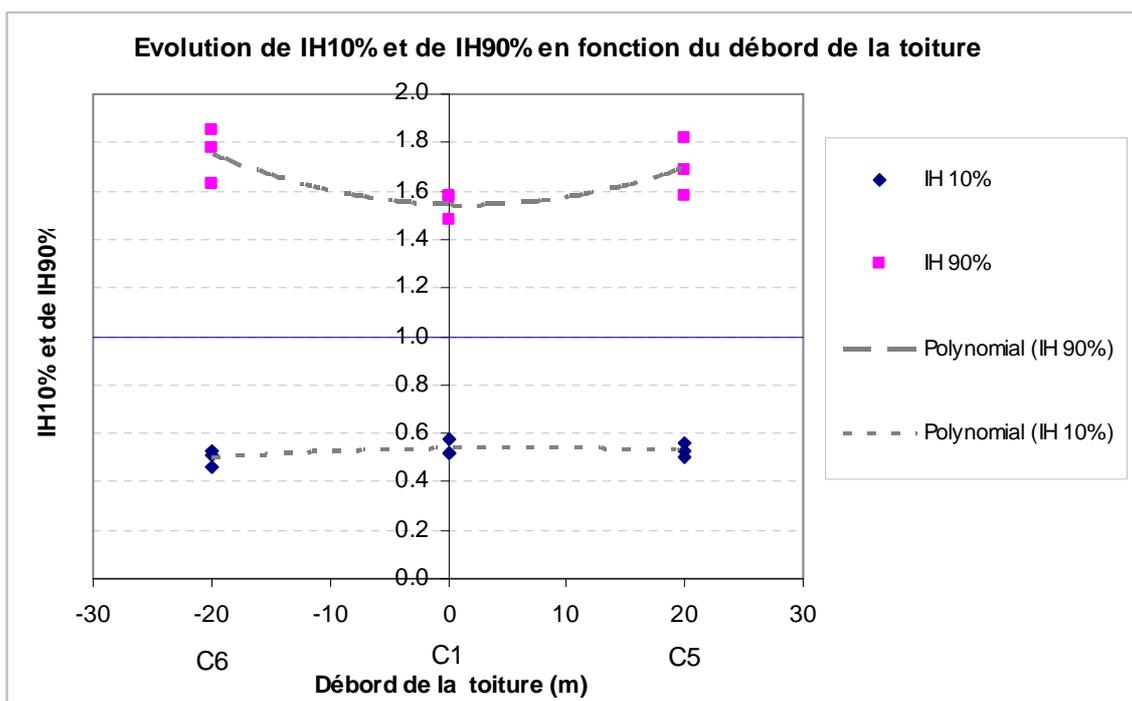


Figure 111 : Variation de valeurs de IH 10% et de IH 90% en fonction du débord de la toiture

Les résultats mettent en évidence qu'autant la toiture débordant vers l'extérieur que la toiture munie d'une ouverture centrale réduite rendent l'écoulement plus hétérogène que une toiture horizontale non débordante. Ces indices présentent peu de sensibilité à l'incidence du vent.

La Figure 112 illustre les aire concernées par le $\Psi_{10\%}$, le $\bar{\Psi}$ et le $\Psi_{90\%}$ en fonction de débord de la toiture et de l'incidence du vent. Les aire concernées par le $\Psi_{10\%}$ ne montrent pas une variation importante pour les incidences diagonales et transversales : les valeurs varient entre 7 et 10.8%. Cependant pour l'incidence longitudinale la variation des aires est considérable : 1.6% pour la C1, 5.2% pour la C5 et 10.1% pour la C6. Quant aux aires concernées par le $\Psi_{90\%}$, elles ne varient pas dans une large mesure pour les incidences diagonale et transversale. En revanche, pour l'incidence longitudinale les aire varient significativement : entre 1.2% et 4.7%.

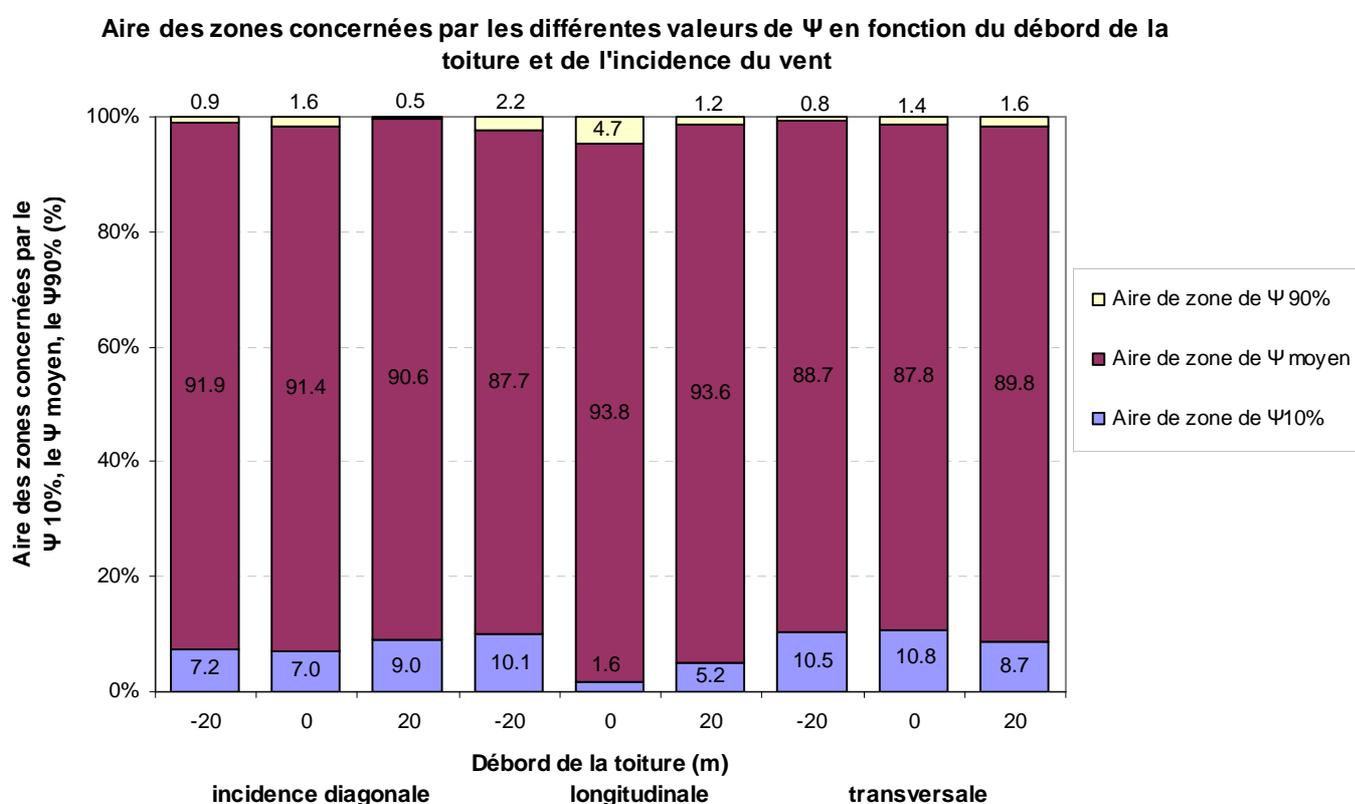


Figure 112 : Aire des zones concernées par le $\Psi_{10\%}$, le $\bar{\Psi}$ et le $\Psi_{90\%}$ en fonction du débord de la toiture et de l'incidence du vent

3. ANALYSE DU CONFORT VISUEL EN LUMIÈRE DU JOUR

3.1 ENSOLEILLEMENT DE L'AIRE DE JEU

La morphologie du stade affecte non seulement les caractéristiques de l'écoulement, mais aussi les conditions d'ensoleillement et d'éclairage dans les stades. Celles-ci déterminent le confort visuel des usagers, en particulier celui des spectateurs qui restent au même emplacement pendant toute la durée de l'événement sportif.

Dans le cadre de l'extension du travail concernant le critère de confort visuel des spectateurs, les conditions lumineuses de l'aire de jeu en lumière du jour sont analysées.

La gêne visuelle des spectateurs est principalement due au contraste créé par l'ombre de la toiture projetée sur l'aire de jeu ensoleillée [Chapitre I. 2]. Ceci est un phénomène qui peut être souvent observé dans les stades dont les gradins et la toiture sont continus. La Figure 113 illustre un stade dont l'aire de jeu est en partie ensoleillée et en partie à l'ombre portée très prononcée de la toiture opaque. Ainsi le contraste, donc la **différence de luminance** entre ces zones signifie une gêne visuelle importante non seulement pour les spectateurs, mais aussi pour les téléspectateurs.



Figure 113 : Contraste créé par l'ombre de la toiture projetée sur l'aire de jeu dans le Stade Incheon en Munhak au Japon

Les conditions lumineuses dans les stades dépendent principalement des facteurs suivants :

- la morphologie du stade,
- les caractéristiques photométriques du matériau de couverture de la toiture,
- la localisation géographique du stade,
- la date et l'heure considérées,
- l'orientation de l'axe longitudinal du stade.

La problématique d'éclairage de l'aire de jeu en lumière du jour est étudiée à travers des essais paramétriques d'ensoleillements menés sur dix différentes configurations de stade étudiées en soufflerie. Les configurations suivantes représentent un intérêt particulier du point de vue de l'ensoleillement :

- C1 – stade avec toiture horizontale;
- C2 – stade avec toiture descendante de 15° vers l'aire de jeu;
- C3 – stade avec toiture montante de 15° vers l'aire de jeu;
- C4 – stade avec façade fermée (façade sans brèches);

- C5 – stade avec toiture avec débord vers l'extérieur;
- C6 – stade avec toiture d'ouverture centrale réduite;
- C7 – stade avec brèche de hauteur augmentée entre la toiture et les gradins;
- C11 – stade avec toiture montante de 30° vers l'aire de jeu;
- C12 – stade sans toiture;
- C13 – stade de football avec toiture horizontale.

Chaque configuration comporte une toiture complètement opaque. Les paramètres morphologiques suivants ont été étudiés pendant les essais paramétriques de l'ensoleillement de l'aire de jeu (les configurations appartenant à un groupe sont indiquées entre parenthèses) :

- inclinaison de la toiture (C1, C2, C3, C11);
- débord de la toiture (C1, C5, C6);
- dimension de l'oculus (C1, C6)
- hauteur de la brèche horizontale entre la toiture et les gradins (C1, C7)
- proportion entre la largeur et la longueur du stade (C1, C13).

La configuration de référence est la configuration 1 (C1) qui comporte une toiture horizontale.

Chaque configuration est modélisée en trois dimensions par le logiciel Rhinoceros. Ces modèles 3D sont utilisés pour le calcul d'ensoleillement de l'aire de jeu par le logiciel BilEclInt développé par la Division Eclairage et Colorimétrie du CSTB Nantes. Au cours des essais paramétriques, l'ensoleillement de l'aire de jeu est calculé pour chaque configuration en conditions d'éclairage parfaites (sur une année complète), supposant un ciel clair - pour trois localisations géographiques différentes :

- Amsterdam (52°21' nord, 4°55' est);
- Nantes (47°12' nord, 1°36' ouest);
- Nice (43°42' nord, 7°15' est).

L'aire de jeu mesure de 120 x 80 mètres et est matérialisée par 651 points espacés les uns des autres d'une distance de 4 mètres. La zone rouge de la Figure 114 illustre l'aire de jeu sur le plan du stade. L'aire de jeu est entourée par la piste d'athlétisme dont l'ensoleillement n'est pas le sujet de cette étude. Les configurations sont étudiées pour deux axes longitudinaux différents qui correspondent aux critères d'orientation du stade [Chapitre I. 1] :

- Axe longitudinal orienté nord – sud;
- Axe longitudinal orienté nord-ouest – sud-est

La liste des configurations étudiées est illustrée par la Figure 115.

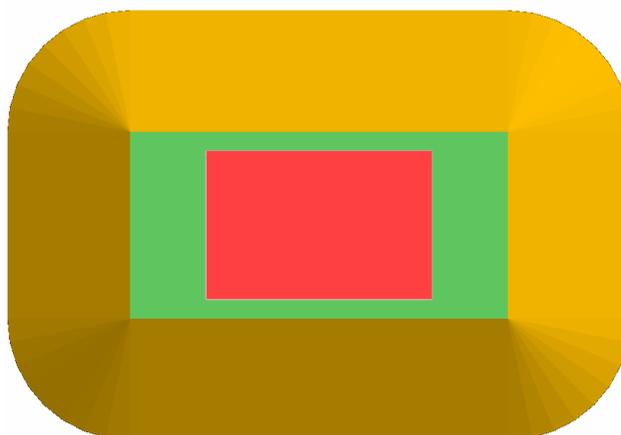
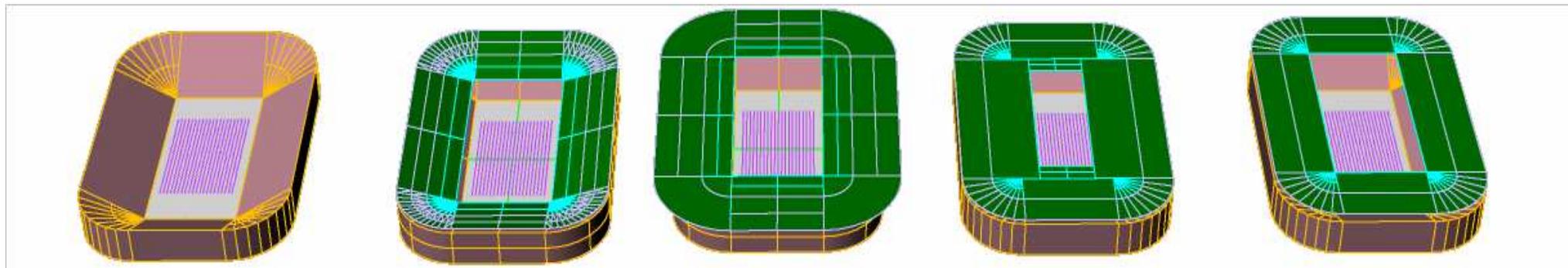


Figure 114 : Plan schématique du stade. La zone rouge représente de l'aire de jeu.

Les résultats sont présentés sous la forme d'un diagramme "calendrier" qui se constitue de lignes d'iso pourcentages d'ensoleillement. L'axe vertical du diagramme indique les mois de l'année, et l'axe horizontal les heures du jour en heures légales. Les différentes zones du diagramme correspondent aux différents taux de surface de l'aire de jeu ensoleillée, notamment à 0 %, à 0 - 25%, à 25-50%, à 50-75%, à 75-100%, et à 100%. L'ensoleillement est calculé par le logiciel BilEclInt par un pas de temps de 2 minutes. L'aire de ces zones indique la durée de l'ensoleillement dans l'année pour chaque intervalle, ce qui est également illustré par un diagramme camembert.

Sur le calendrier les zones noires représentent les heures de nuit quand le soleil est en dessous de l'horizon. Les zones bleues indiquent la situation quand l'aire de jeu est à l'ombre de la toiture opaque ou des gradins, en conséquence elle reçoit uniquement du rayonnement diffus venant du ciel. Les zones rouges indiquent la durée pendant laquelle l'intégralité de l'aire de jeu est ensoleillée.

L'éclairage uniforme de l'aire de jeu en lumière du jour peut être atteint soit dans le cas où **l'intégralité de l'aire de jeu est ensoleillée**, soit dans le cas où **l'intégralité de l'aire de jeu est à l'ombre** de la toiture et/ou des gradins. Ainsi sur le diagramme calendrier et sur celui de camembert la somme des zones rouges (100% est ensoleillée) et les zones bleues (0% est ensoleillée) décrit la durée annuelle des conditions lumineuses uniformes pour un stade particulier.



C12

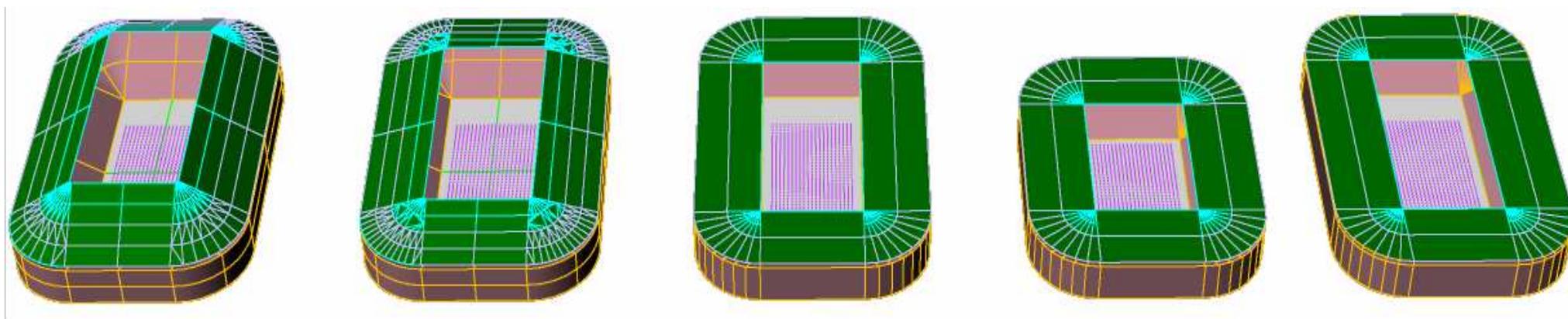
C2

C5

C6

C7

Figure 115 : Ensemble des configurations testées pendant les essais paramétriques de l'ensoleillement de l'aire de jeu



C11

C3

C1

C13

C4

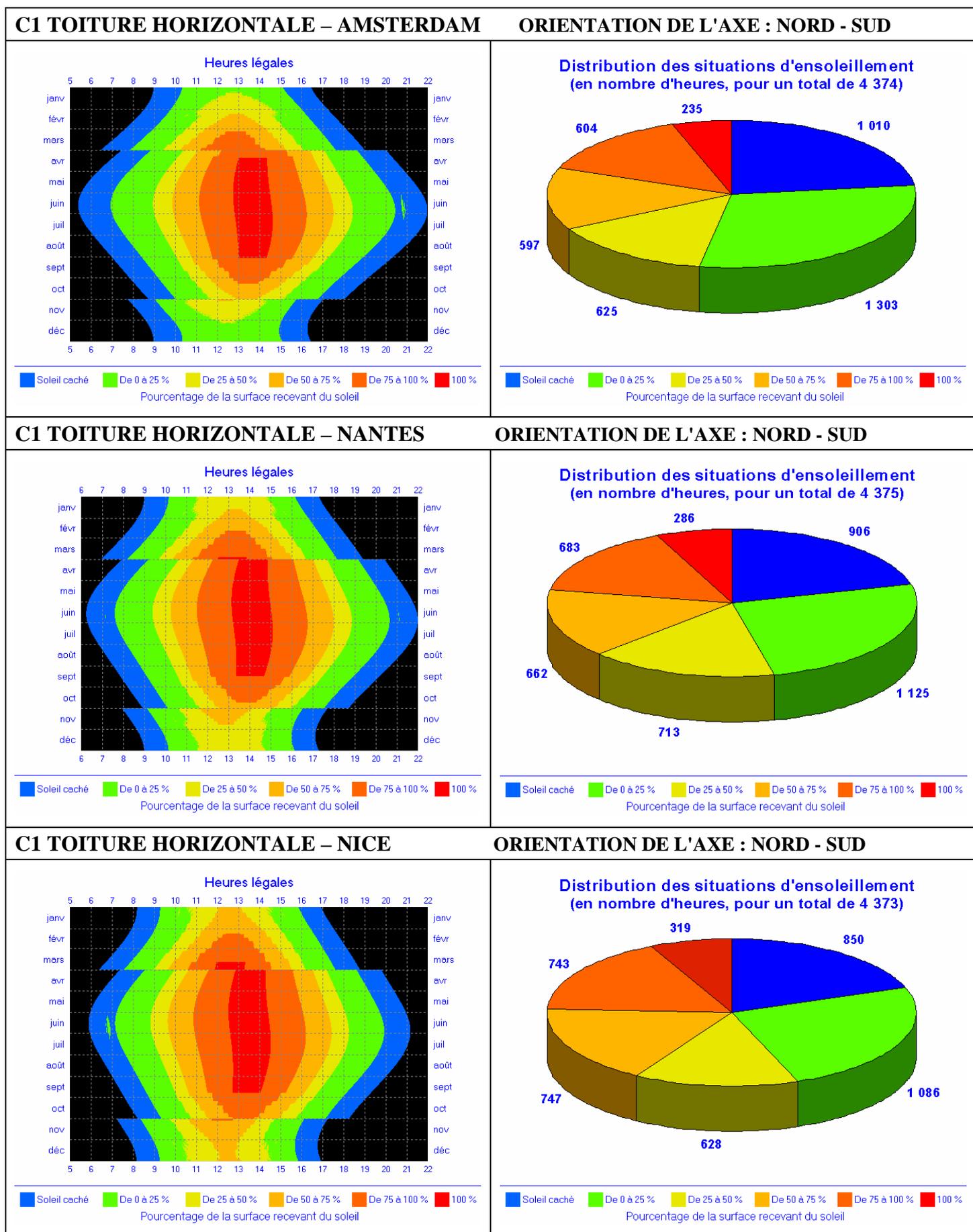
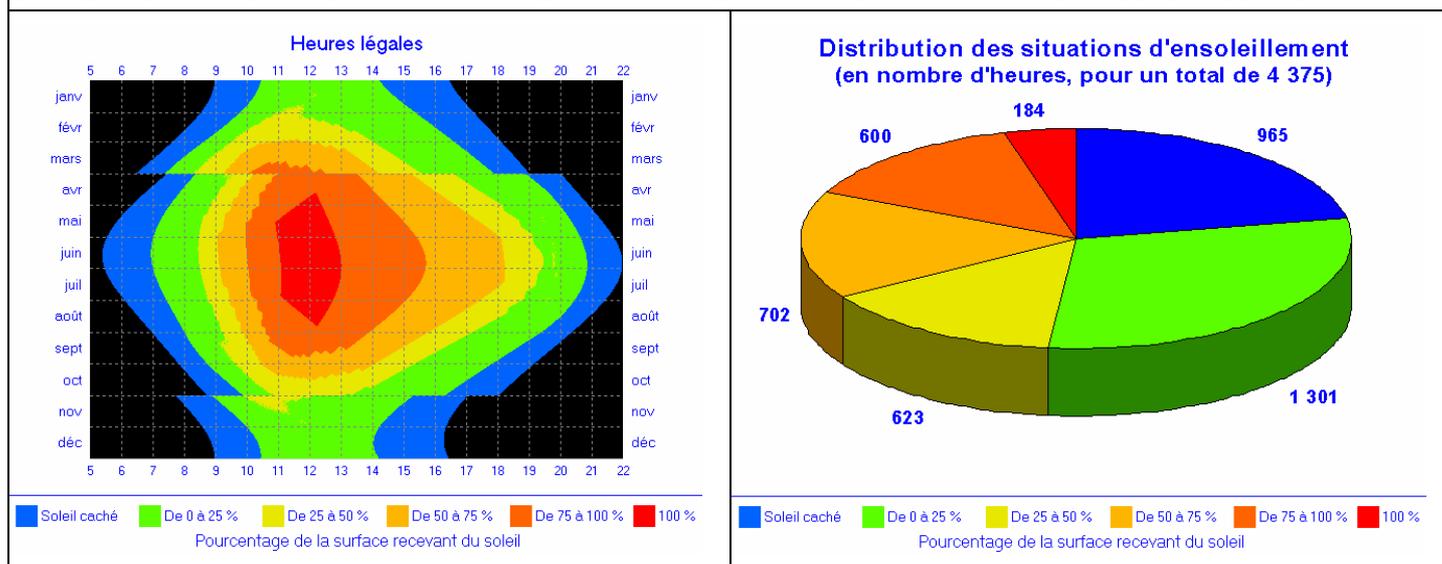
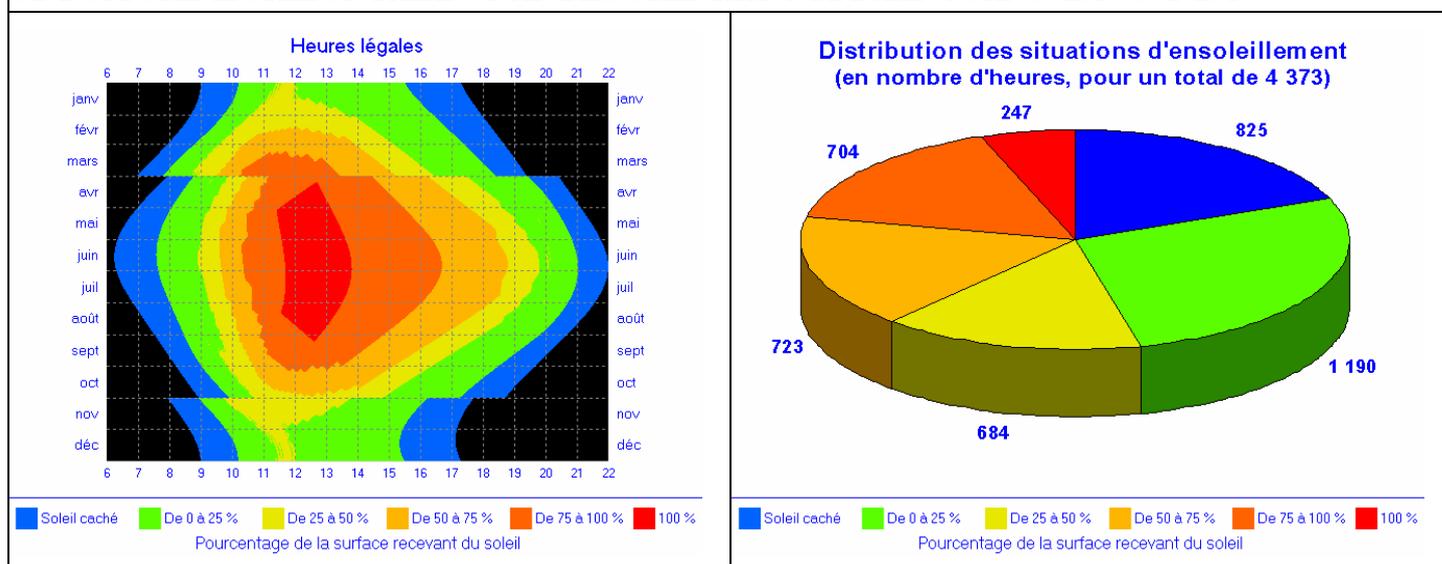


Tableau 18 : Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 1 (C1) avec l'axe longitudinale orienté nord – sud.

C1 TOITURE HORIZONTALE – AMSTERDAM ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST



C1 TOITURE HORIZONTALE – NANTES ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST



C1 TOITURE HORIZONTALE – NICE ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST

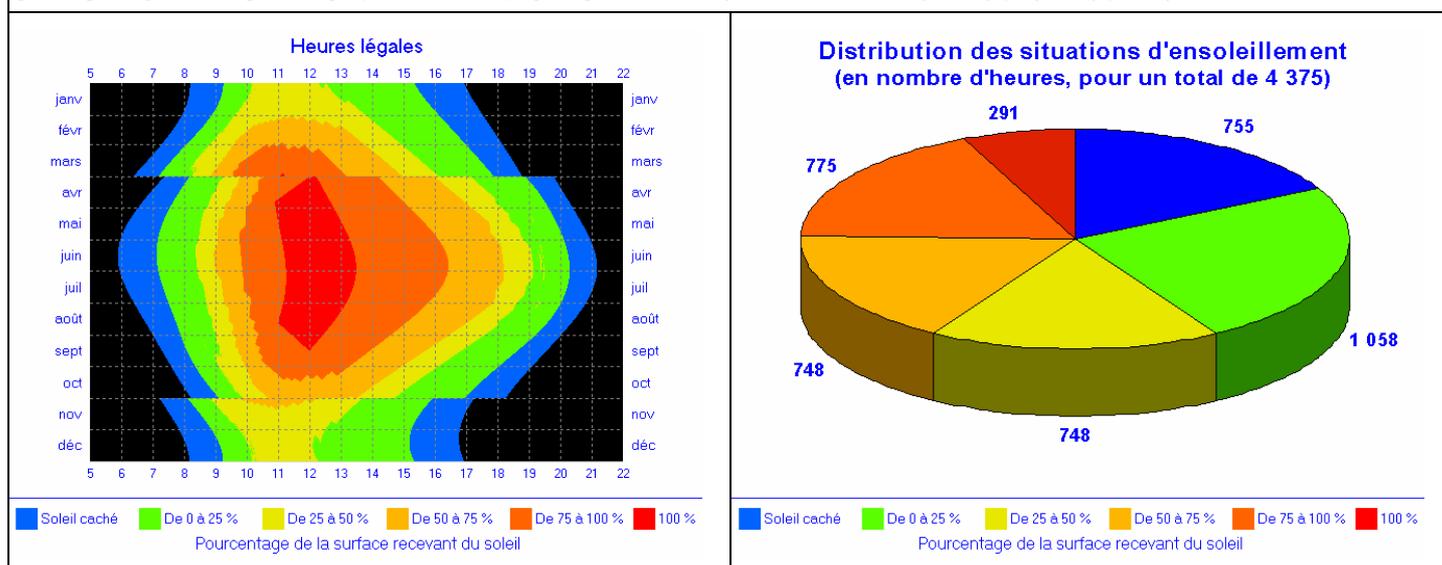


Tableau 19 : Ensoleillement de l'aire de jeu pour la configuration 1 (C1) avec l'axe longitudinale orienté nord-ouest – sud-est.

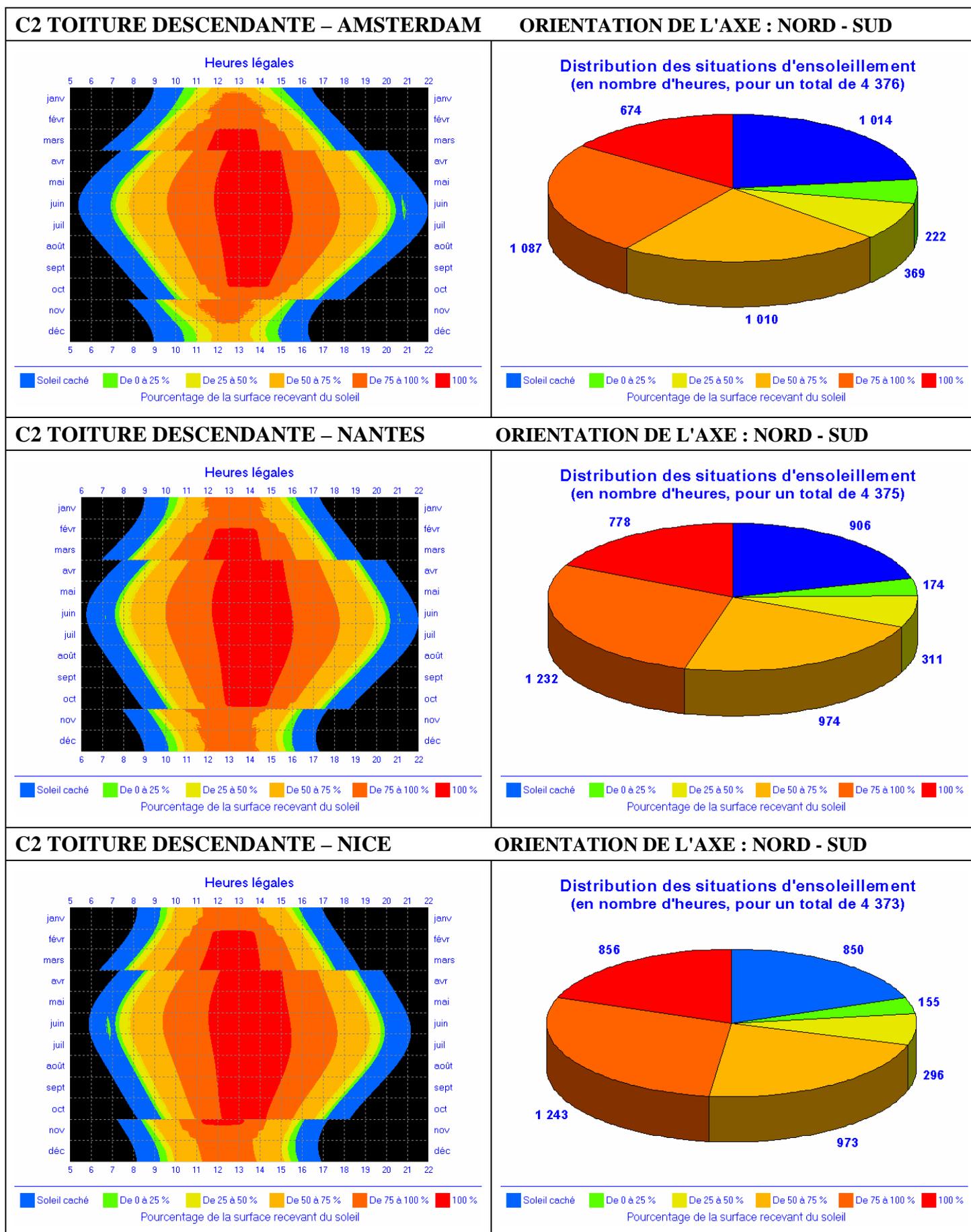


Tableau 20: Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 2 (C2) avec l'axe longitudinale orienté nord – sud.

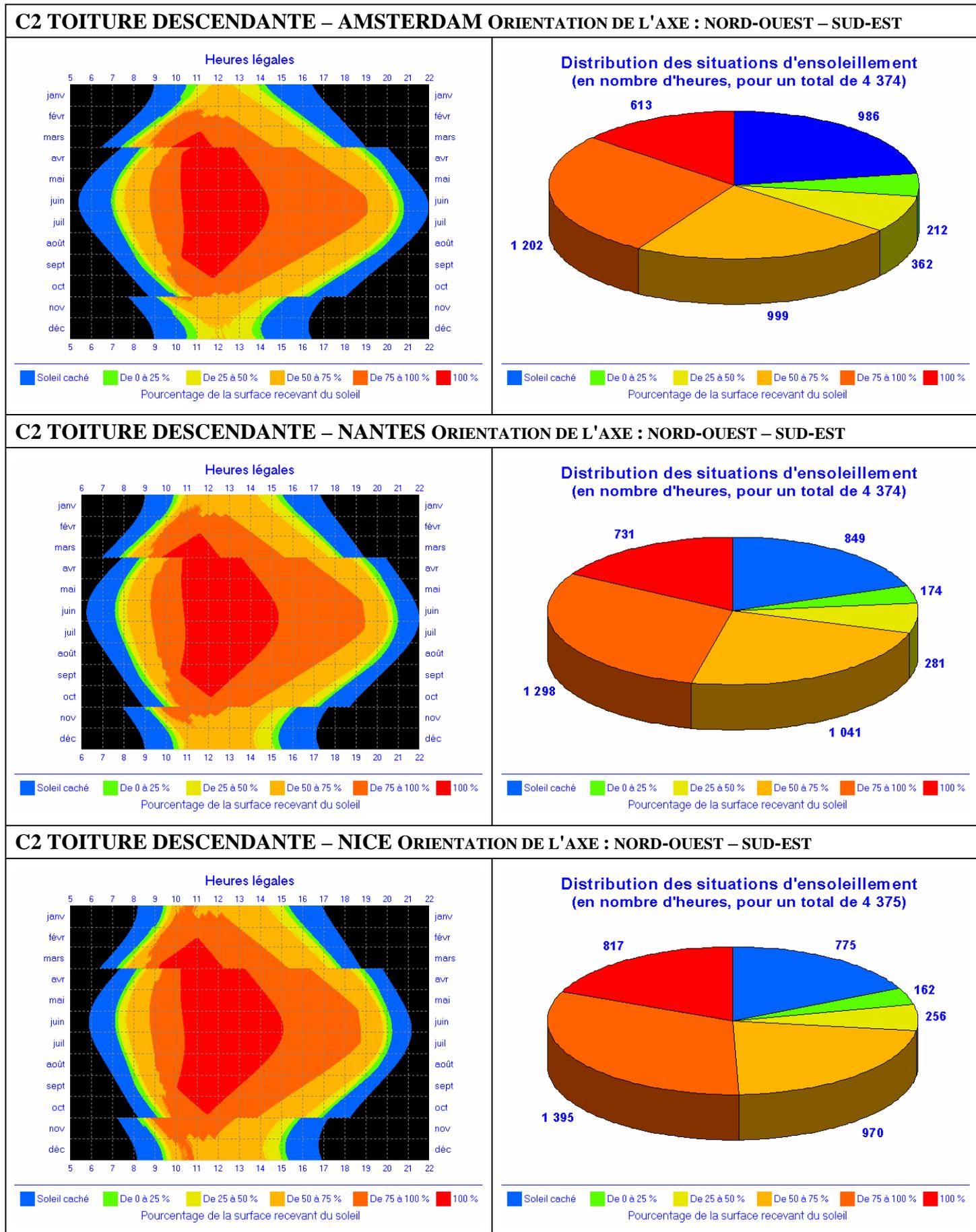


Tableau 21 : Ensoleillement de l'aire de jeu pour la configuration 2 (C2) avec l'axe longitudinale orienté nord-ouest – sud-est.

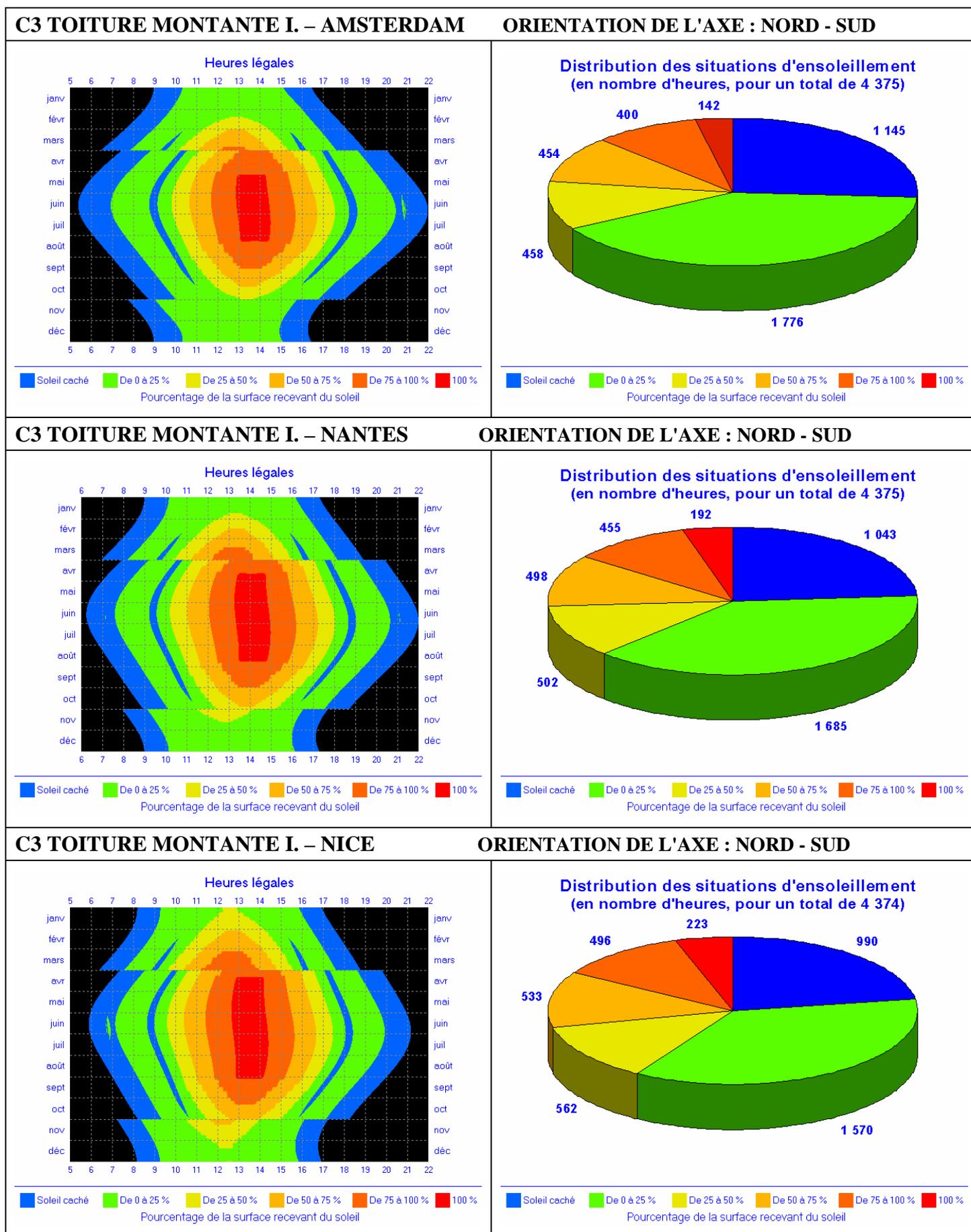
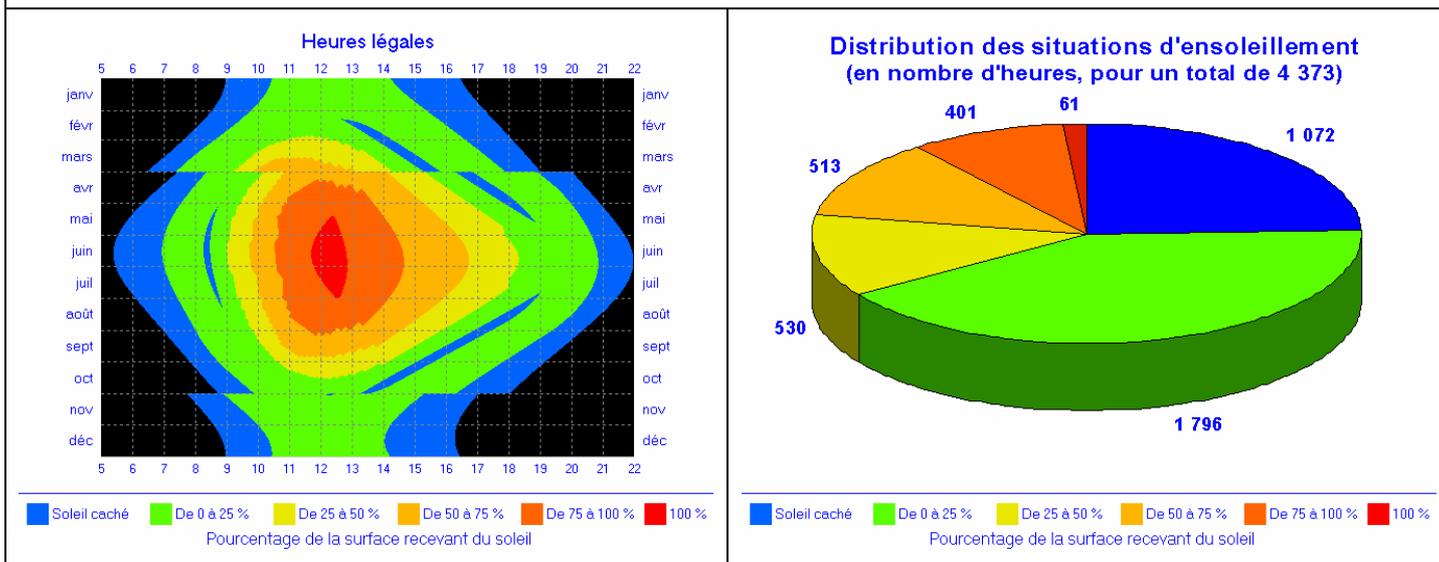
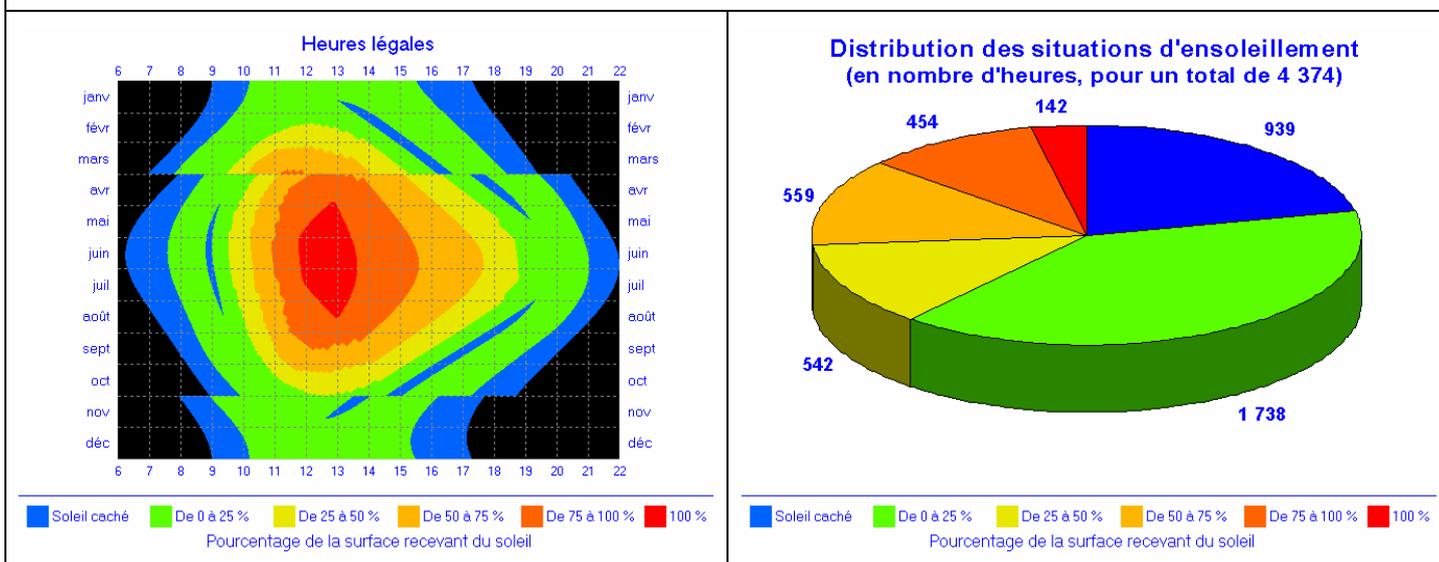


Tableau 22 : Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 3 (C3) avec l'axe longitudinale orienté nord – sud.

C3 TOITURE MONTANTE I. – AMSTERDAM ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST



C3 TOITURE MONTANTE I. – NANTES ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST



C3 TOITURE MONTANTE I. – NICE ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST

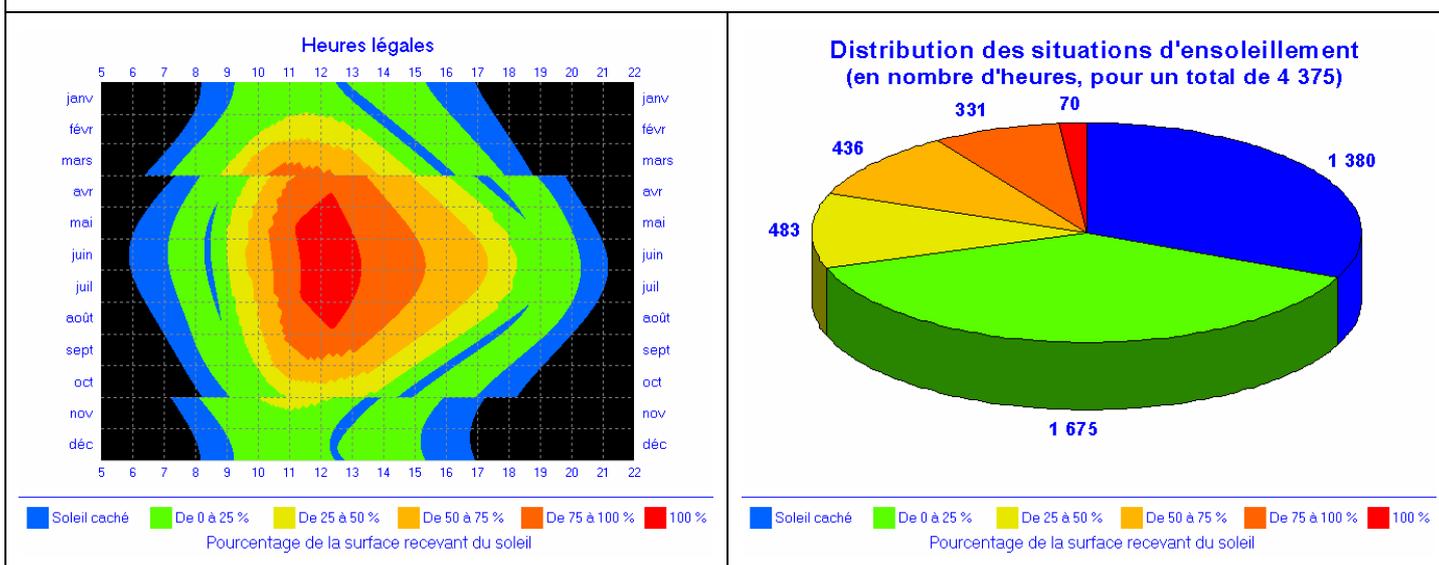


Tableau 23 : Ensoleillement de l'aire de jeu pour la configuration 3 (C3) avec l'axe longitudinale orienté nord-ouest – sud-est.

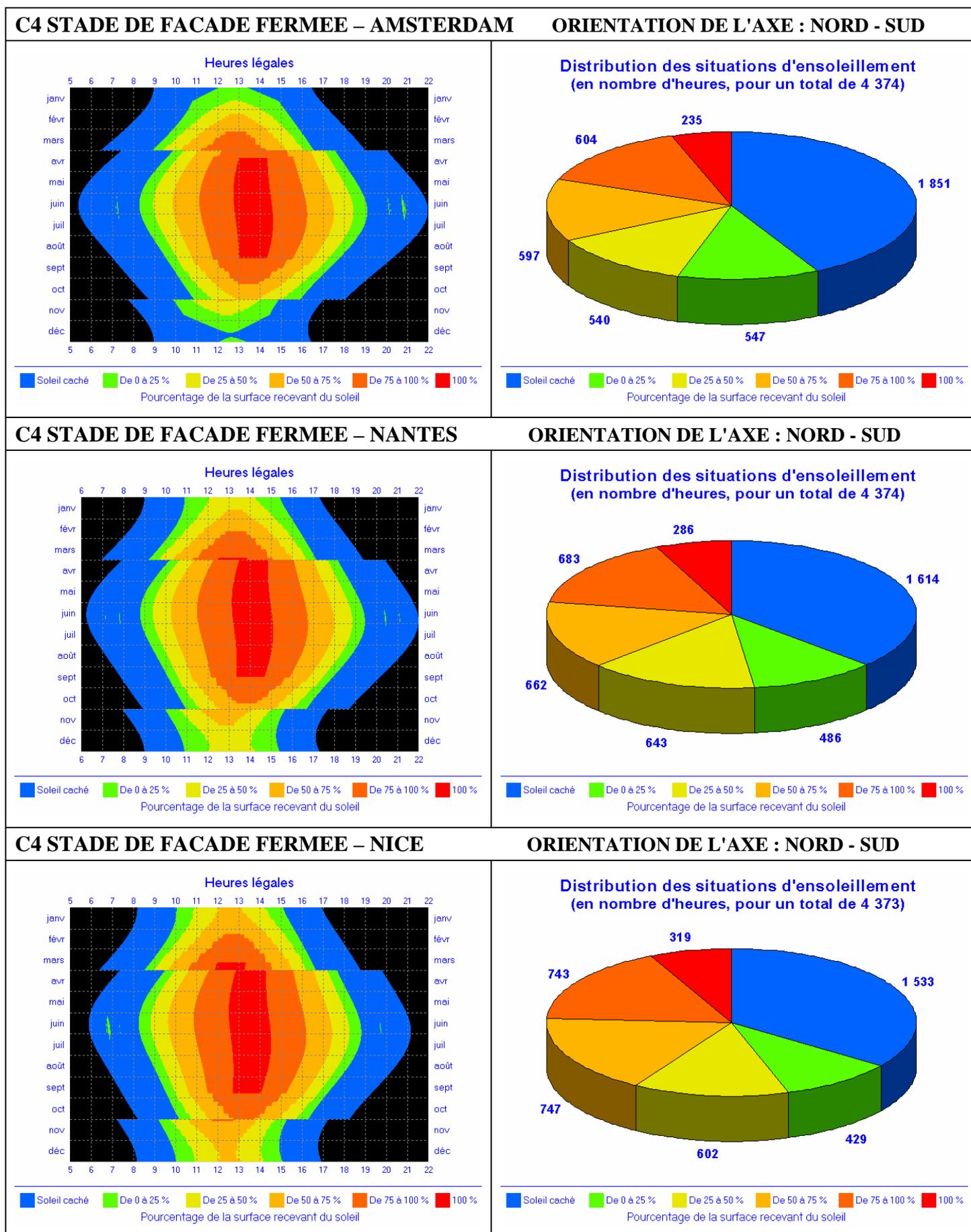


Tableau 24 : Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 4 (C4) avec l'axe longitudinale orienté nord – sud.

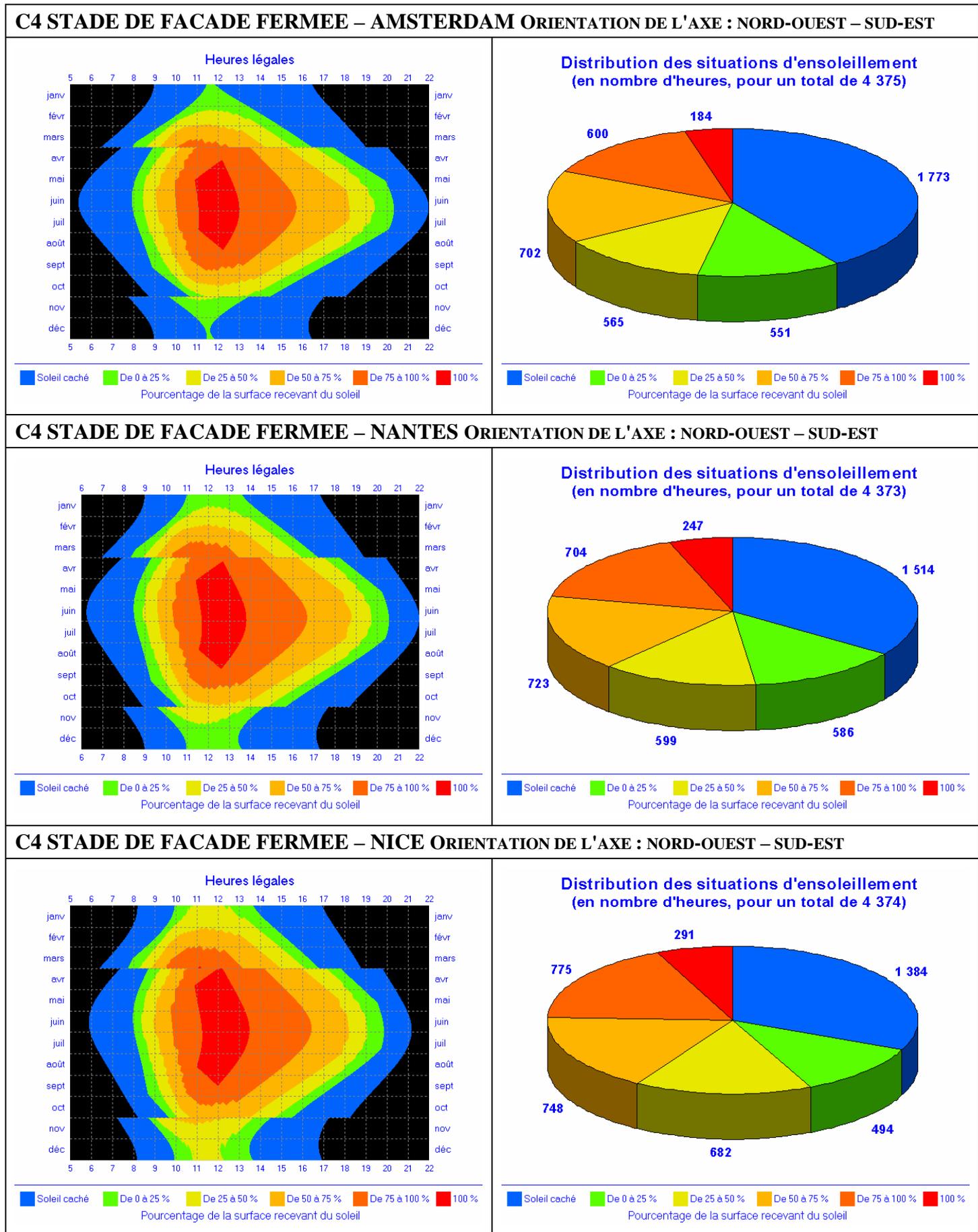


Tableau 25 : Ensoleillement de l'aire de jeu pour la configuration 4 (C4) avec l'axe longitudinale orienté nord-ouest – sud-est.

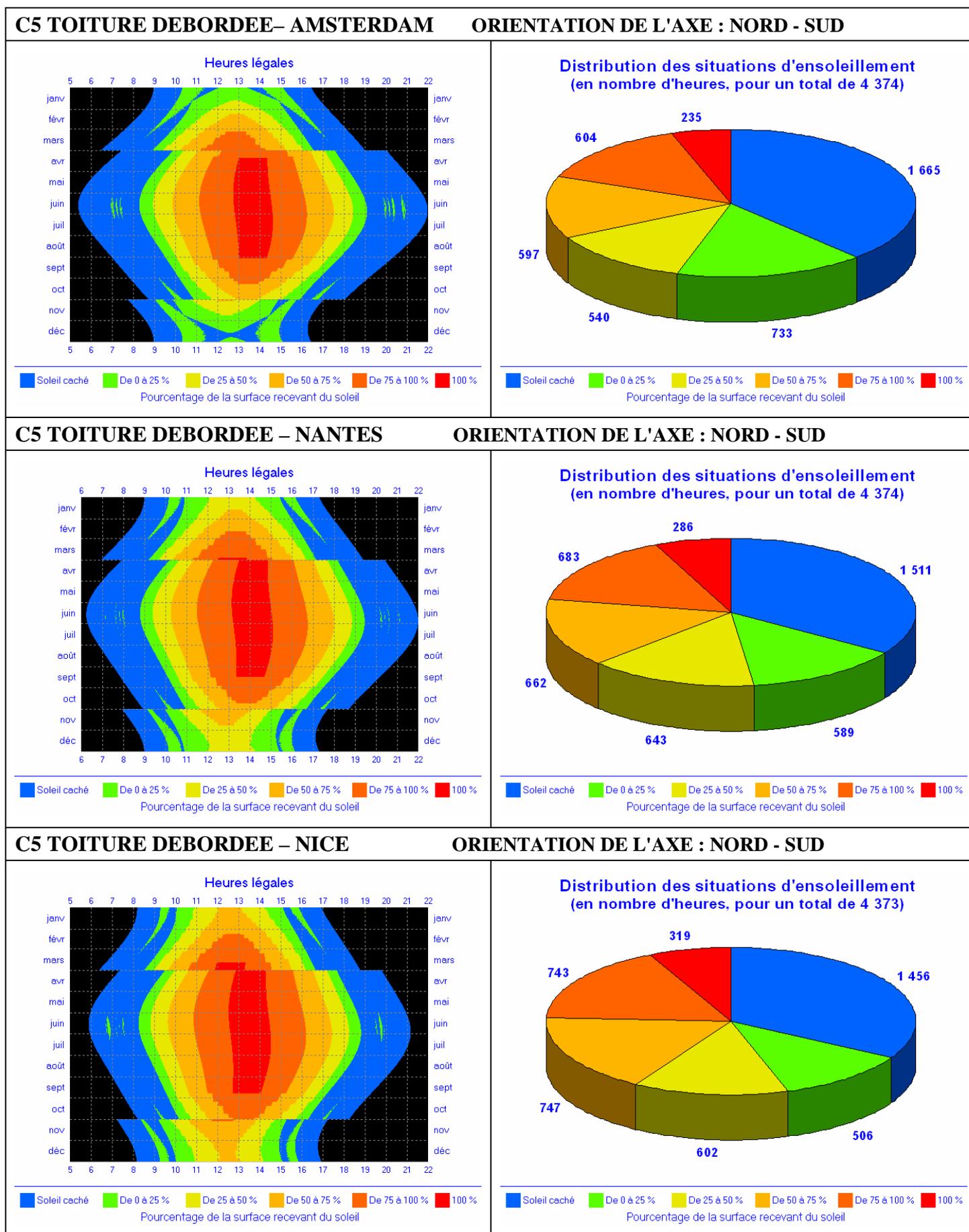
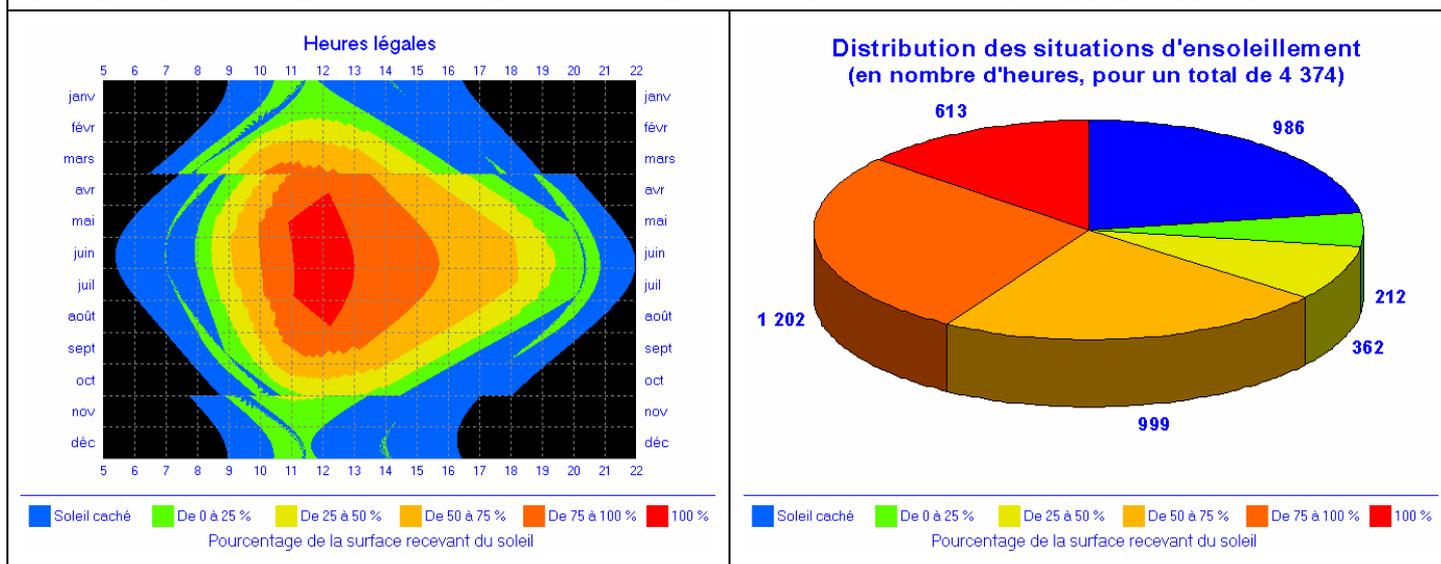
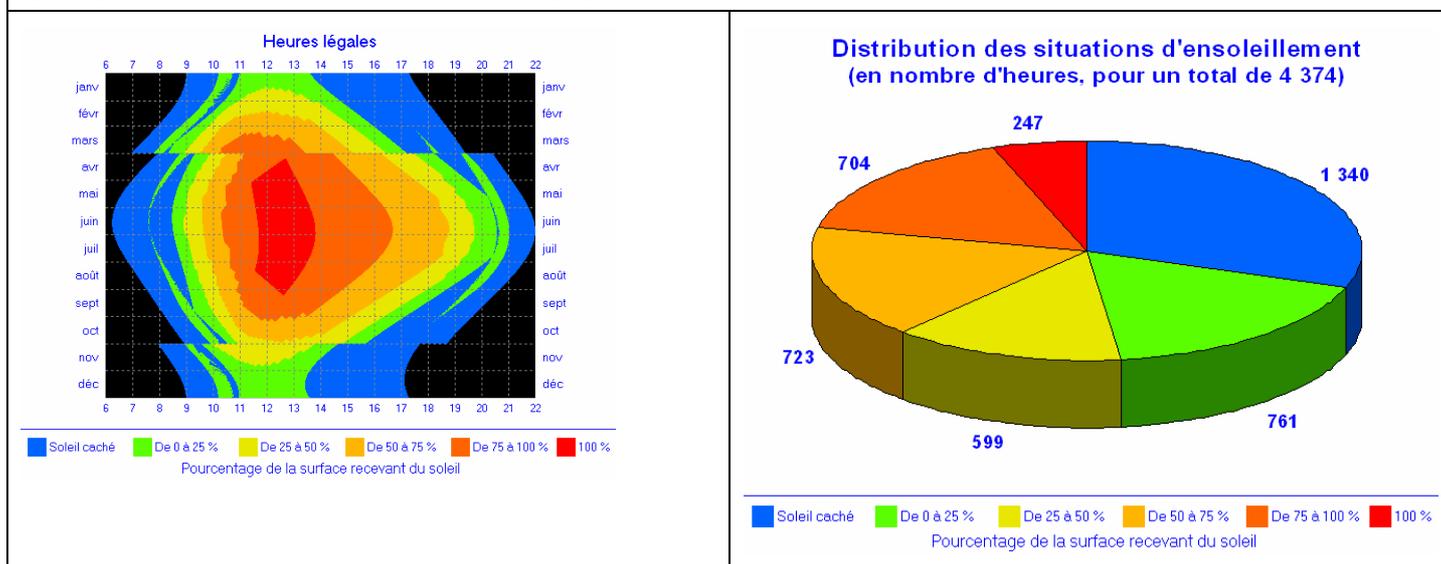


Tableau 26 : Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 5 (C5) avec l'axe longitudinale orienté nord – sud.

C5 TOITURE DEBORDEE – AMSTERDAM ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST



C5 TOITURE DEBORDEE – NANTES ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST



C5 TOITURE DEBORDEE – NICE ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST

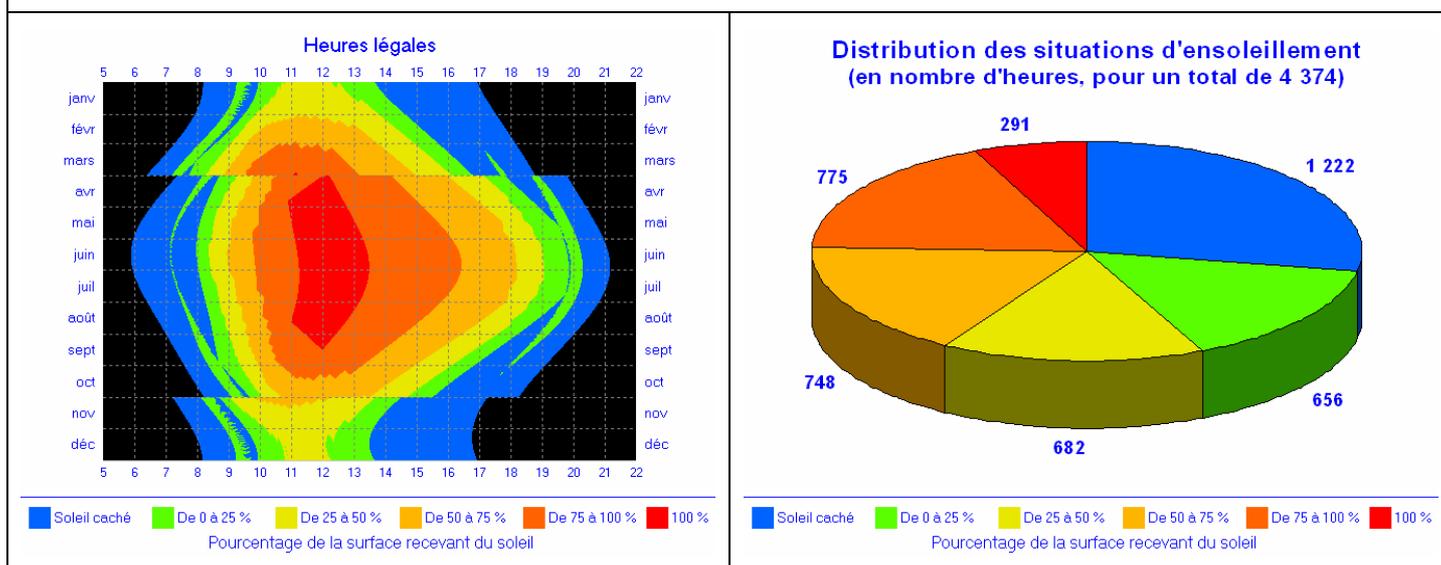


Tableau 27 : Ensoleillement de l'aire de jeu pour la configuration 5 (C5) avec l'axe longitudinale orienté nord-ouest – sud-est.

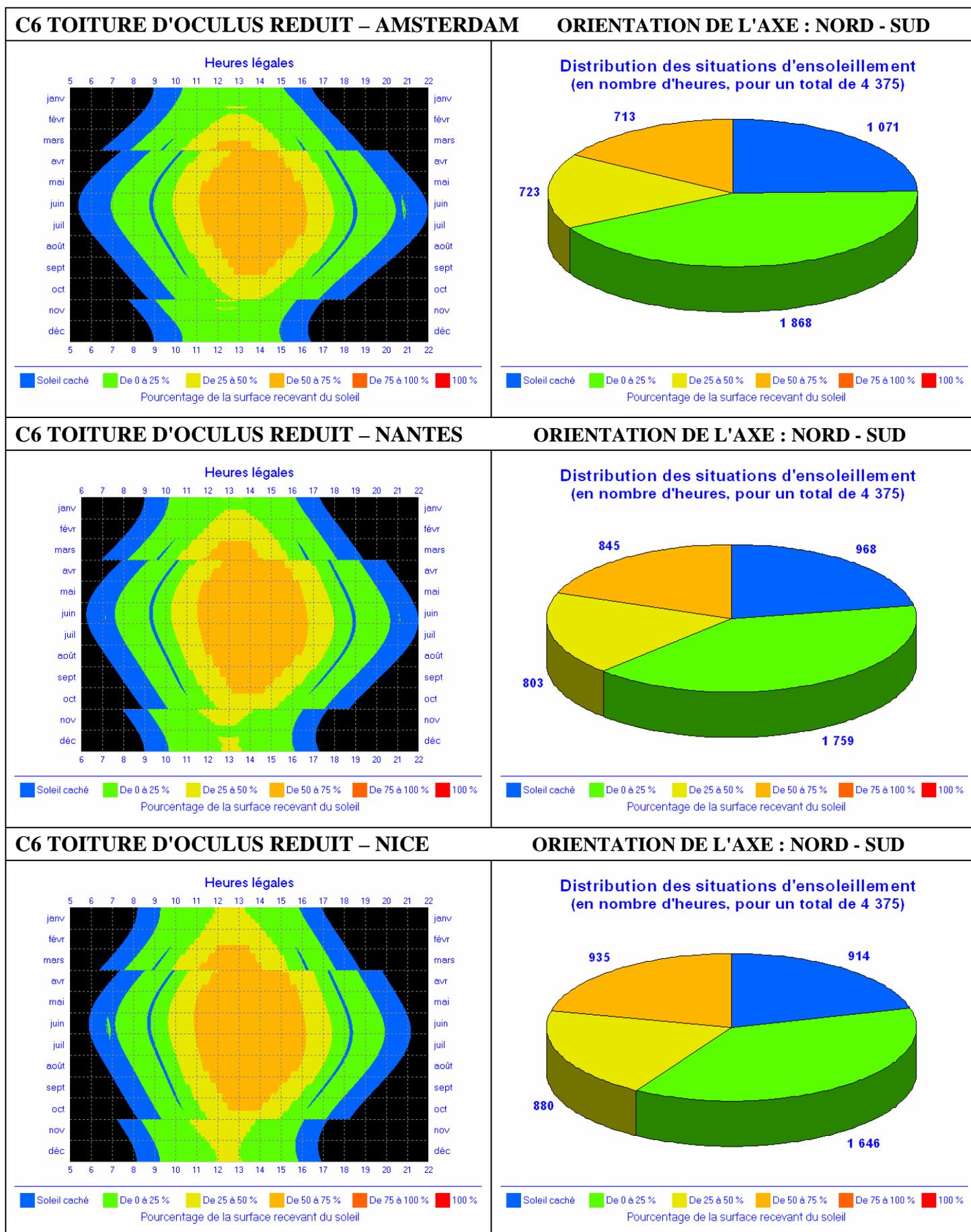


Tableau 28 : Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 6 (C6) avec l'axe longitudinale orienté nord – sud.

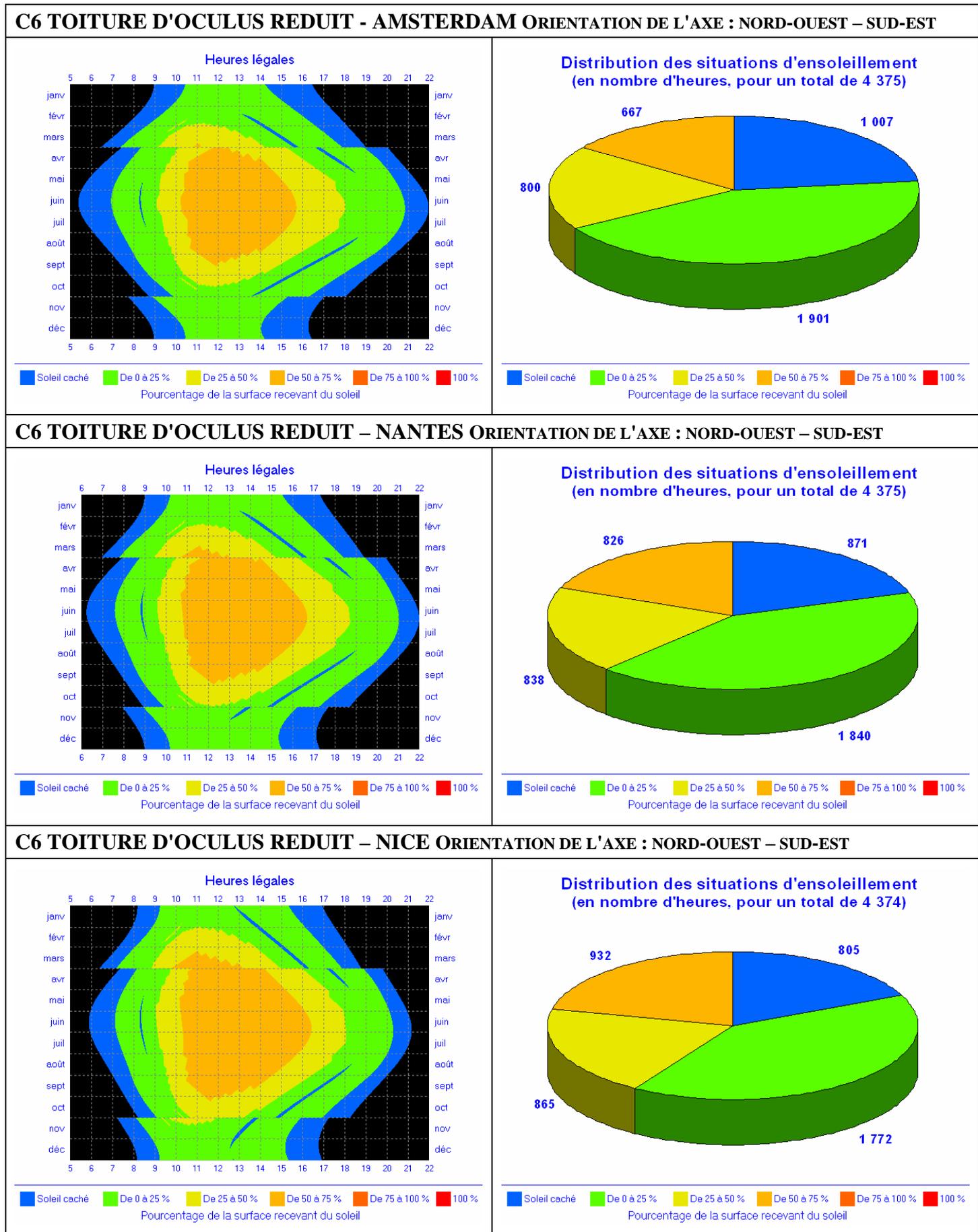
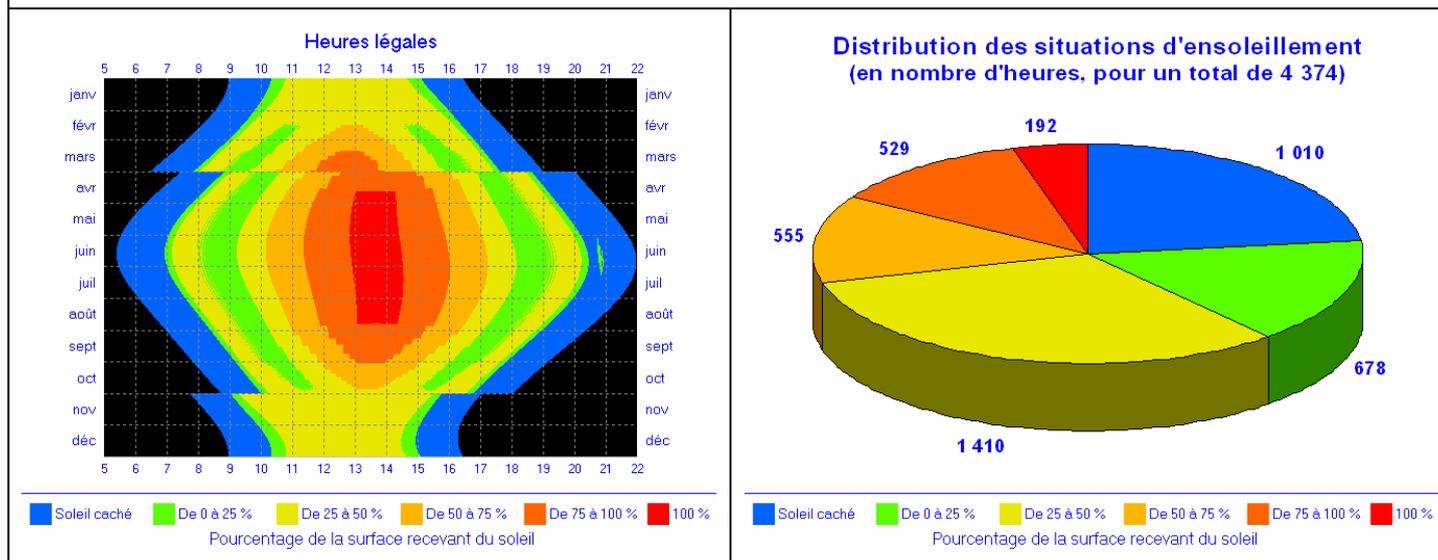
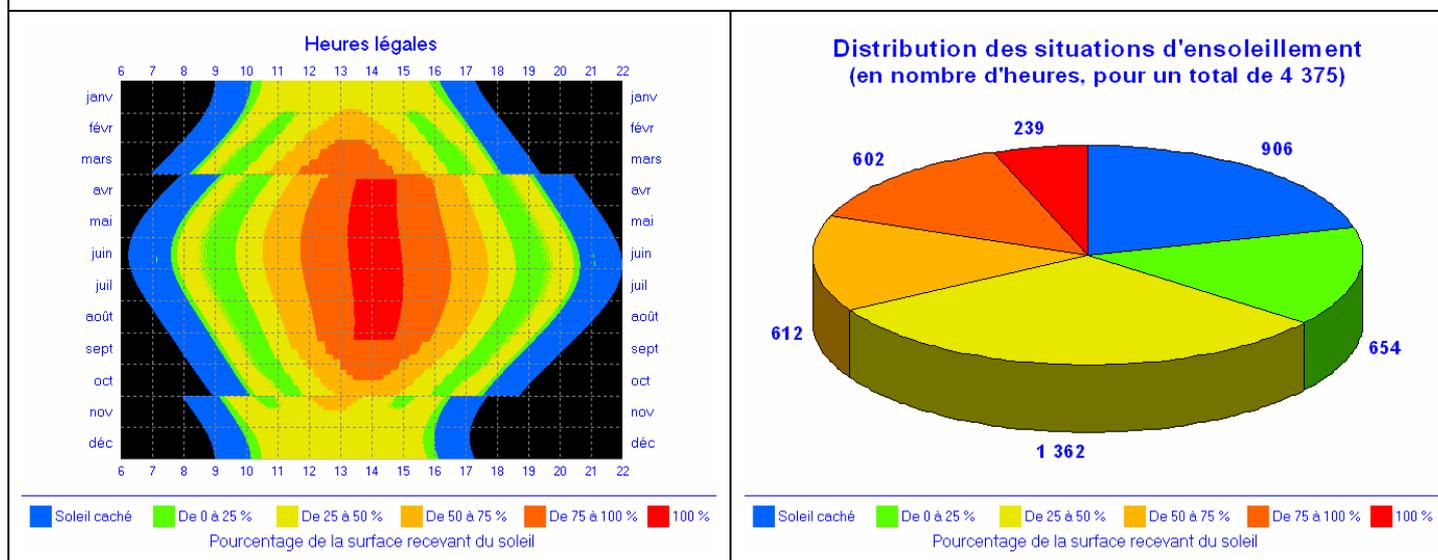


Tableau 29 : Ensoleillement de l'aire de jeu pour la configuration 6 (C6) avec l'axe longitudinale orienté nord-ouest – sud-est.

C7 TOITURE ELOIGNEE DES GRADINS – AMSTERDAM ORIENTATION DE L'AXE: NORD - SUD



C7 TOITURE ELOIGNEE DES GRADINS – NANTES ORIENTATION DE L'AXE : NORD - SUD



C7 TOITURE ELOIGNEE DES GRADINS. – NICE ORIENTATION DE L'AXE : NORD - SUD

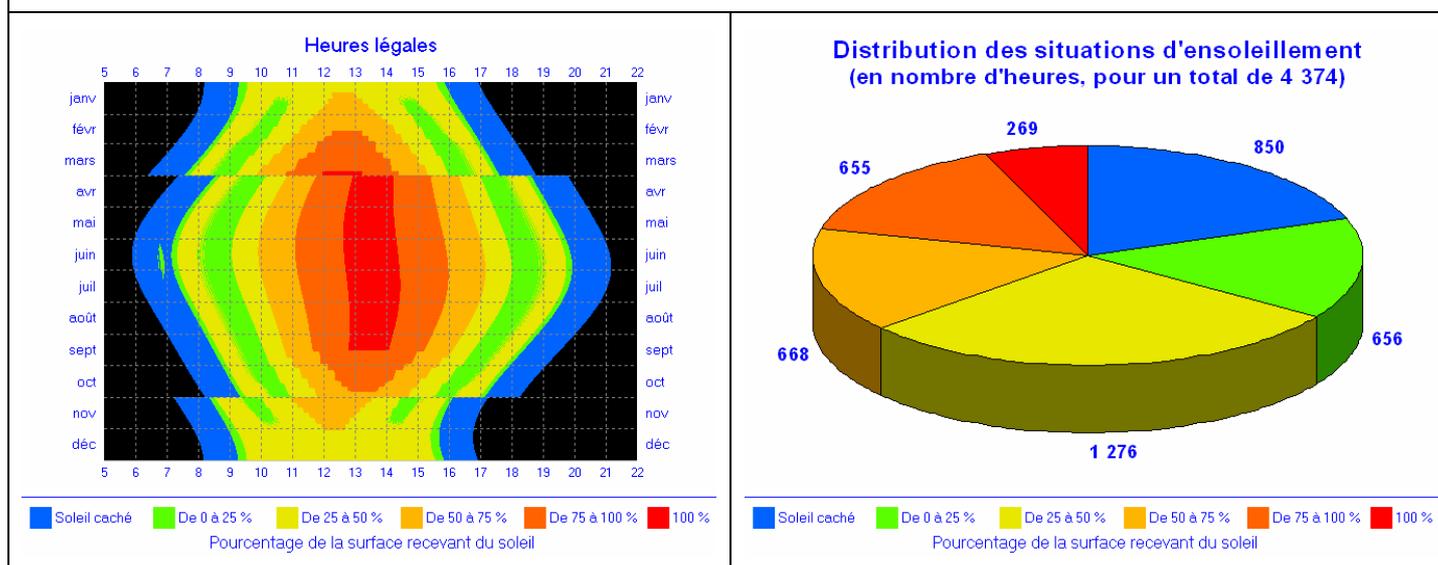


Tableau 30 : Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 7 (C7) avec l'axe longitudinale orienté nord – sud.

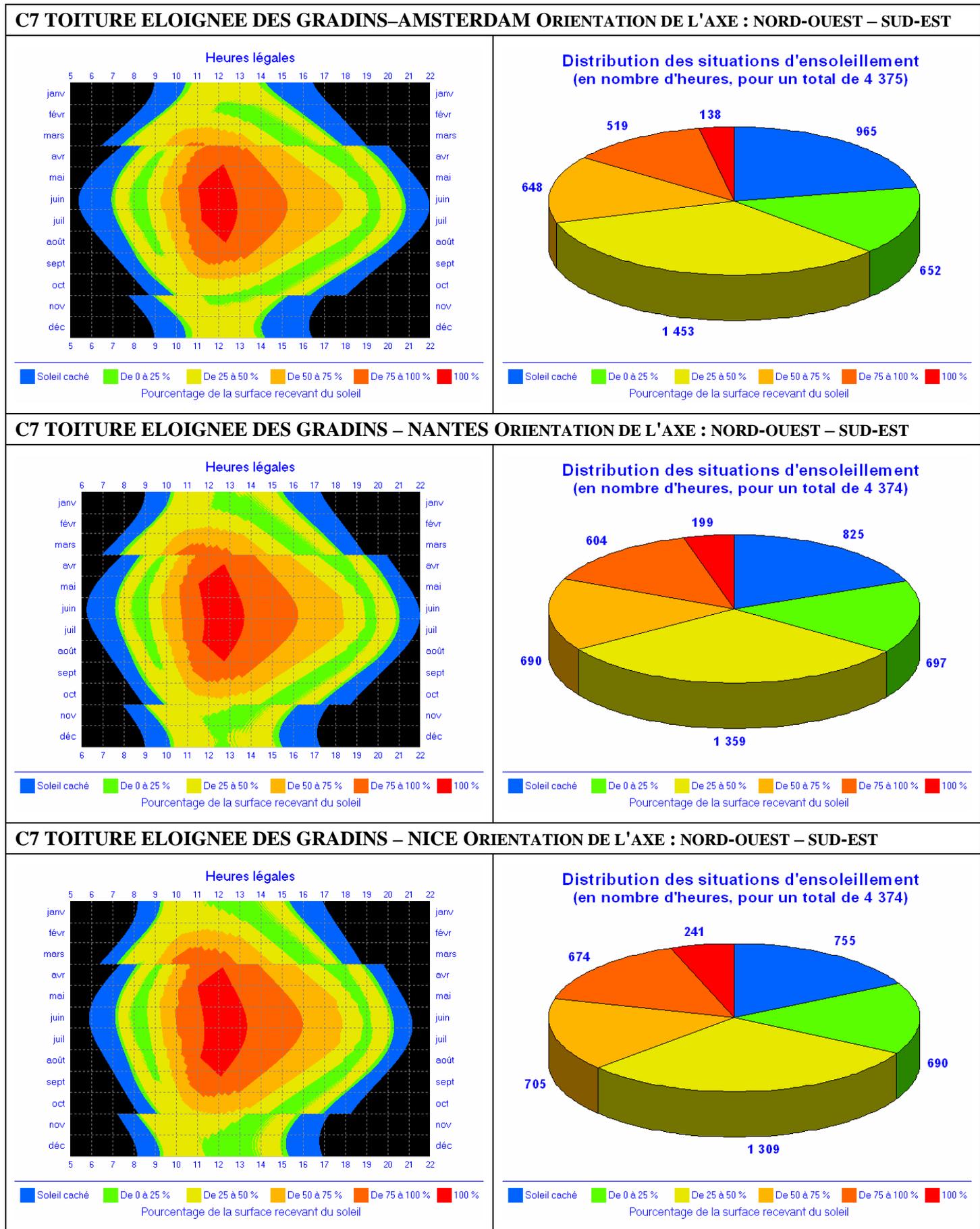


Tableau 31 : Ensoleillement de l'aire de jeu pour la configuration 7 (C7) avec l'axe longitudinale orienté nord-ouest – sud-est.

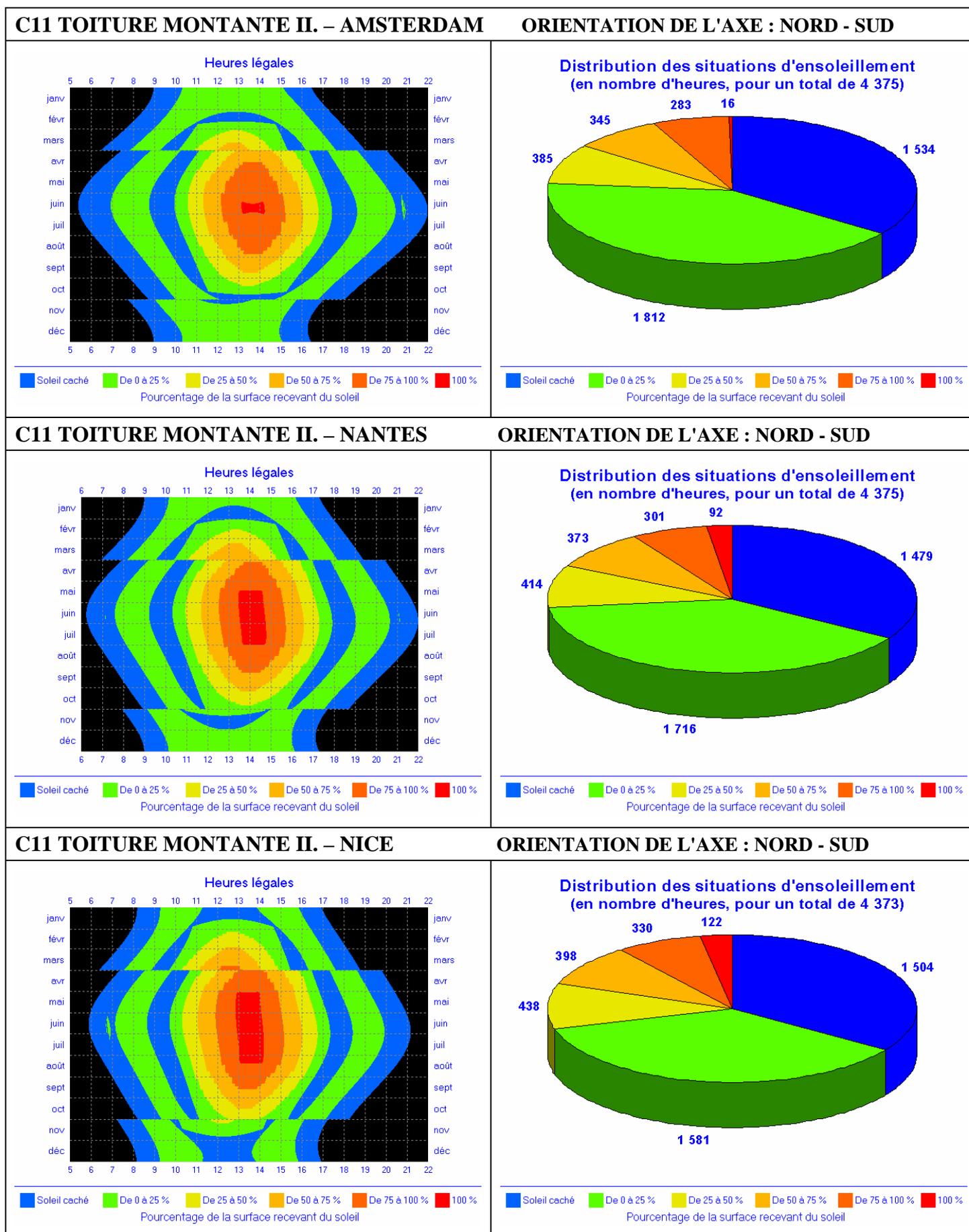


Tableau 32 : Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 11 (C11) avec l'axe longitudinale orienté nord – sud.

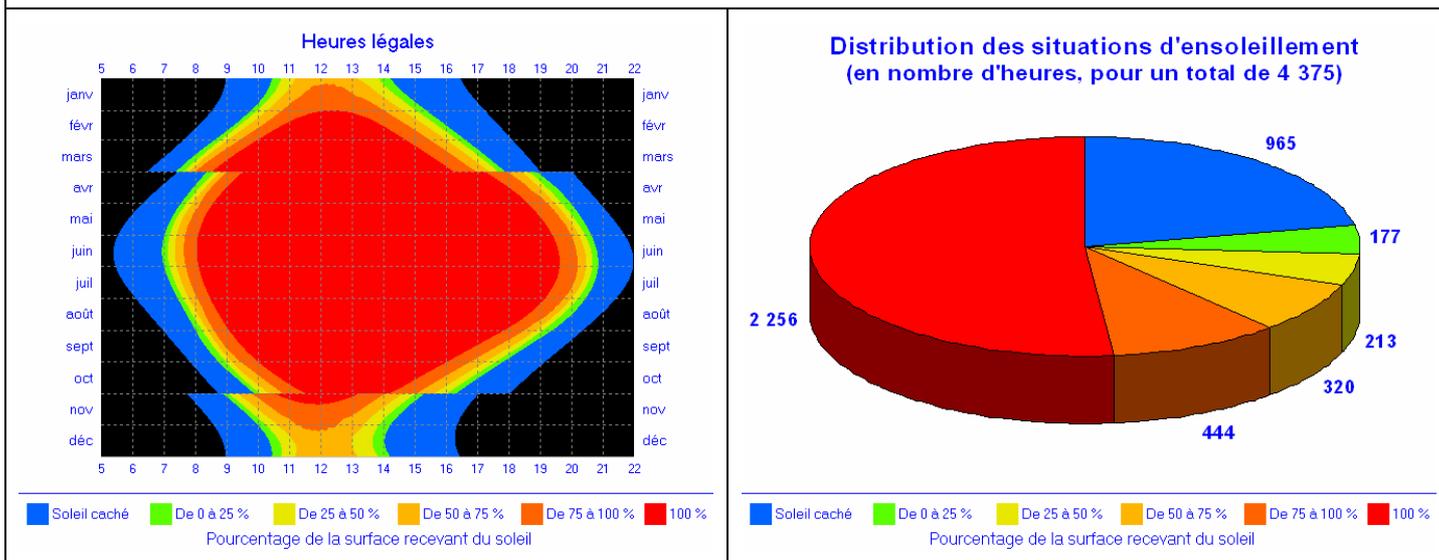
C11 TOITURE MONTANTE II. – AMSTERDAM ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST	
<p>Heures légales</p> <p>Pourcentage de la surface recevant du soleil</p> <ul style="list-style-type: none"> Soleil caché De 0 à 25 % De 25 à 50 % De 50 à 75 % De 75 à 100 % 100 % 	<p>Distribution des situations d'ensoleillement (en nombre d'heures, pour un total de 4 374)</p> <p>Pourcentage de la surface recevant du soleil</p> <ul style="list-style-type: none"> Soleil caché De 0 à 25 % De 25 à 50 % De 50 à 75 % De 75 à 100 % 100 %
C11 TOITURE MONTANTE II. – NANTES ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST	
<p>Heures légales</p> <p>Pourcentage de la surface recevant du soleil</p> <ul style="list-style-type: none"> Soleil caché De 0 à 25 % De 25 à 50 % De 50 à 75 % De 75 à 100 % 100 % 	<p>Distribution des situations d'ensoleillement (en nombre d'heures, pour un total de 4 375)</p> <p>Pourcentage de la surface recevant du soleil</p> <ul style="list-style-type: none"> Soleil caché De 0 à 25 % De 25 à 50 % De 50 à 75 % De 75 à 100 % 100 %
C11 TOITURE MONTANTE II. – NICE ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST	
<p>Heures légales</p> <p>Pourcentage de la surface recevant du soleil</p> <ul style="list-style-type: none"> Soleil caché De 0 à 25 % De 25 à 50 % De 50 à 75 % De 75 à 100 % 100 % 	<p>Distribution des situations d'ensoleillement (en nombre d'heures, pour un total de 4 375)</p> <p>Pourcentage de la surface recevant du soleil</p> <ul style="list-style-type: none"> Soleil caché De 0 à 25 % De 25 à 50 % De 50 à 75 % De 75 à 100 % 100 %

Tableau 33 : Ensoleillement de l'aire de jeu pour la configuration 11 (C11) avec l'axe longitudinale orienté nord-ouest – sud-est.

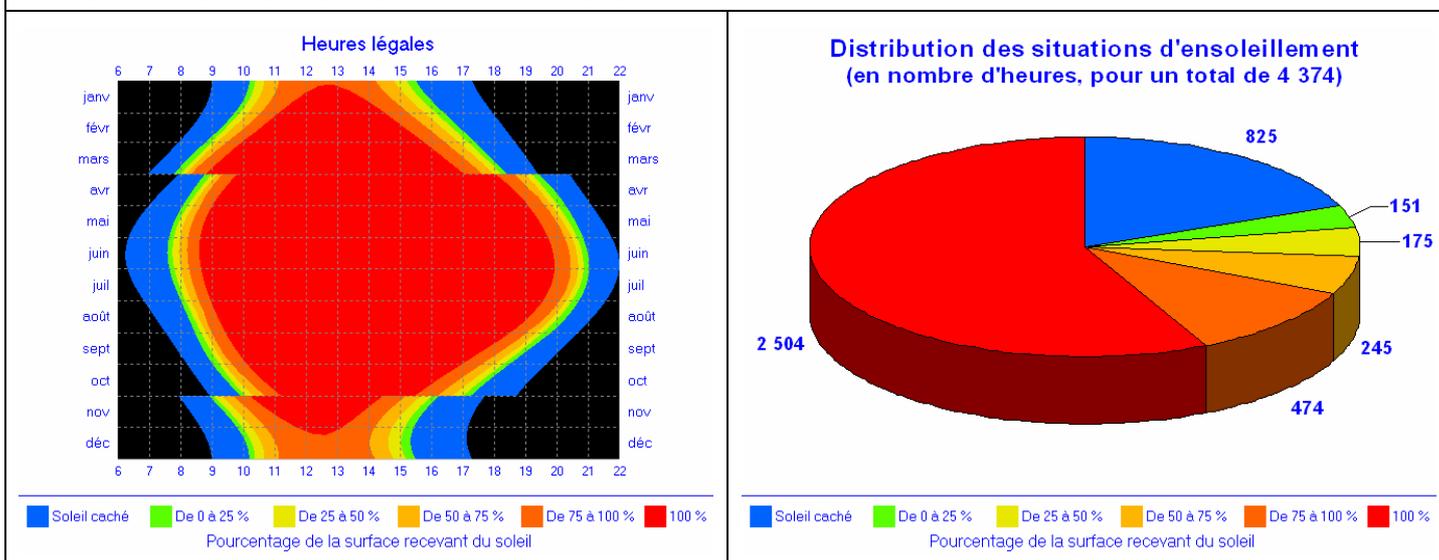
C12 STADE SANS TOITURE – AMSTERDAM	ORIENTATION DE L'AXE : NORD - SUD
<p>Heures légales</p> <p>■ Soleil caché ■ De 0 à 25 % ■ De 25 à 50 % ■ De 50 à 75 % ■ De 75 à 100 % ■ 100 % Pourcentage de la surface recevant du soleil</p>	<p>Distribution des situations d'ensoleillement (en nombre d'heures, pour un total de 4 375)</p> <p>■ Soleil caché ■ De 0 à 25 % ■ De 25 à 50 % ■ De 50 à 75 % ■ De 75 à 100 % ■ 100 % Pourcentage de la surface recevant du soleil</p>
C12 STADE SANS TOITURE – NANTES	ORIENTATION DE L'AXE : NORD - SUD
<p>Heures légales</p> <p>■ Soleil caché ■ De 0 à 25 % ■ De 25 à 50 % ■ De 50 à 75 % ■ De 75 à 100 % ■ 100 % Pourcentage de la surface recevant du soleil</p>	<p>Distribution des situations d'ensoleillement (en nombre d'heures, pour un total de 4 374)</p> <p>■ Soleil caché ■ De 0 à 25 % ■ De 25 à 50 % ■ De 50 à 75 % ■ De 75 à 100 % ■ 100 % Pourcentage de la surface recevant du soleil</p>
C12 STADE SANS TOITURE – NICE	ORIENTATION DE L'AXE : NORD - SUD
<p>Heures légales</p> <p>■ Soleil caché ■ De 0 à 25 % ■ De 25 à 50 % ■ De 50 à 75 % ■ De 75 à 100 % ■ 100 % Pourcentage de la surface recevant du soleil</p>	<p>Distribution des situations d'ensoleillement (en nombre d'heures, pour un total de 4 373)</p> <p>■ Soleil caché ■ De 0 à 25 % ■ De 25 à 50 % ■ De 50 à 75 % ■ De 75 à 100 % ■ 100 % Pourcentage de la surface recevant du soleil</p>

Tableau 34 : Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 12 (C12) avec l'axe longitudinale orienté nord – sud.

C12 STADE SANS TOITURE – AMSTERDAM ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST



C12 STADE SANS TOITURE – NANTES ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST



C12 STADE SANS TOITURE – NICE ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST

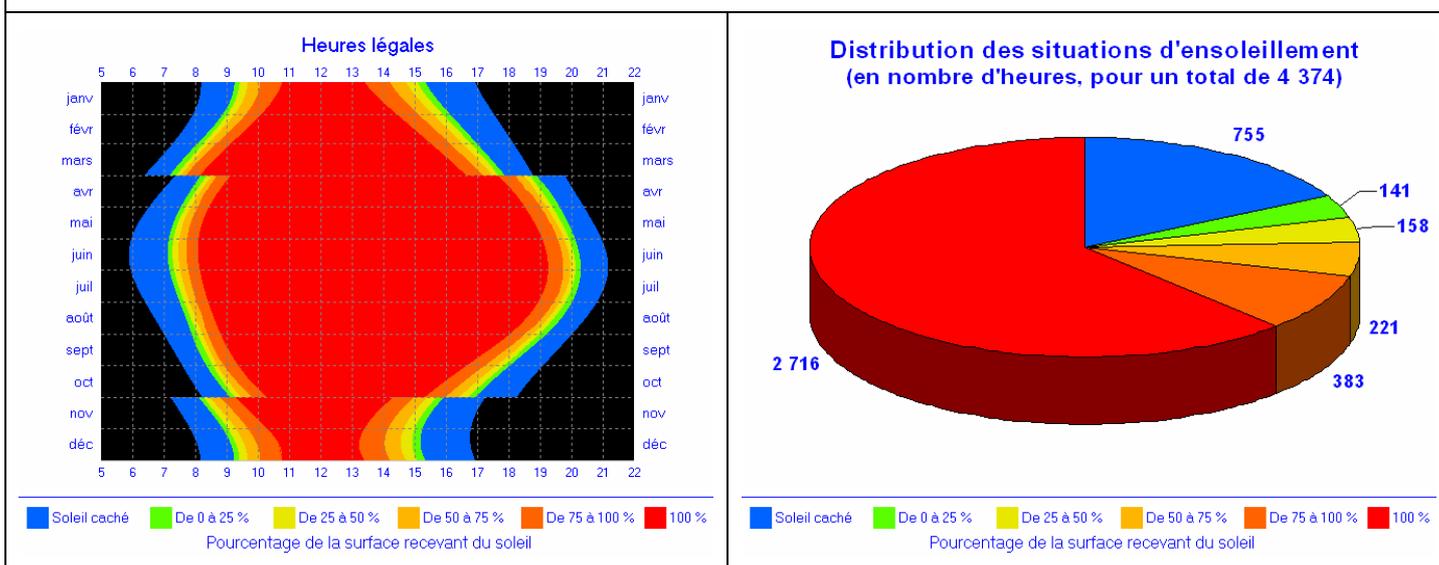


Tableau 35 : Ensoleillement de l'aire de jeu pour la configuration 12 (C12) avec l'axe longitudinale orienté nord-ouest – sud-est.

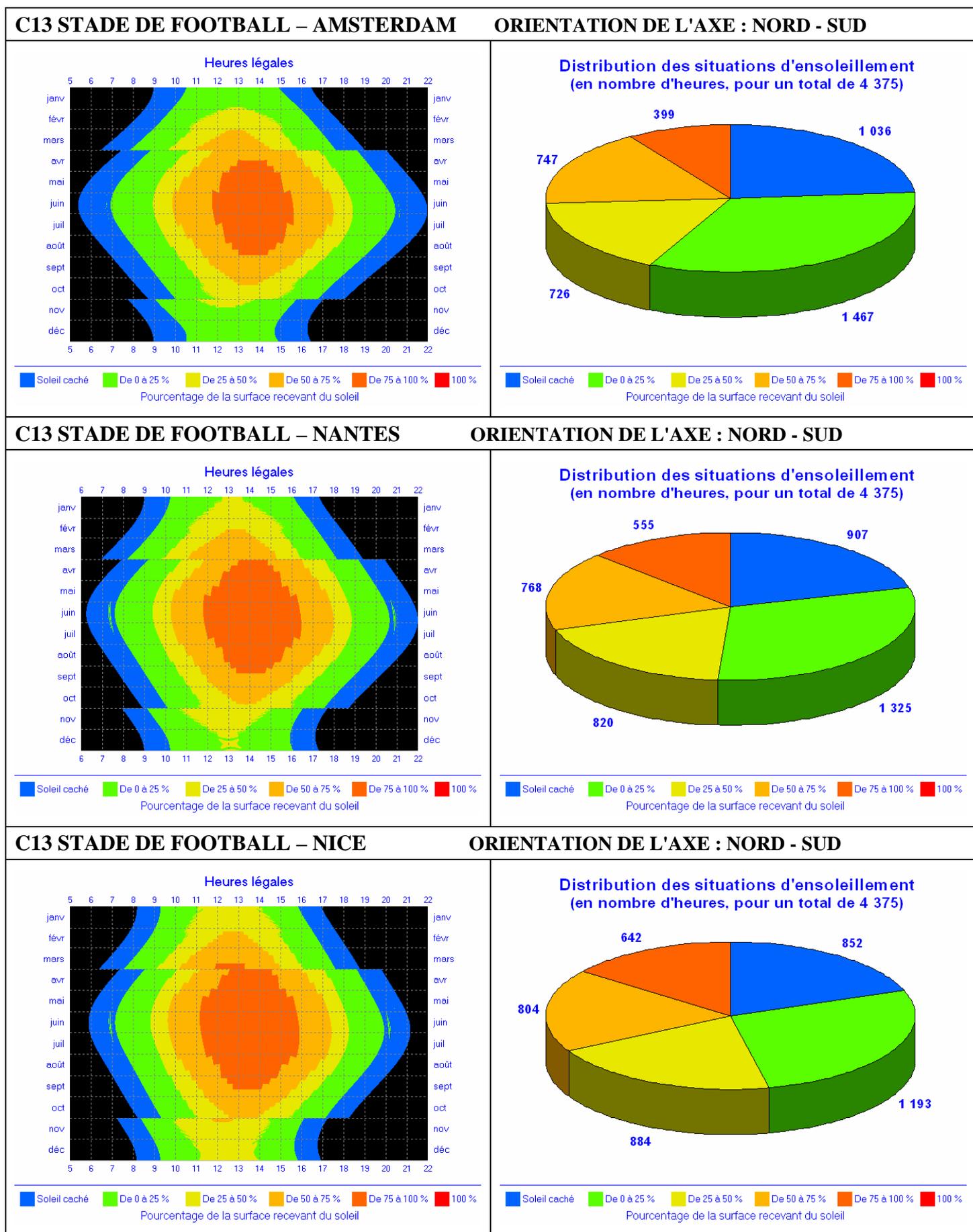
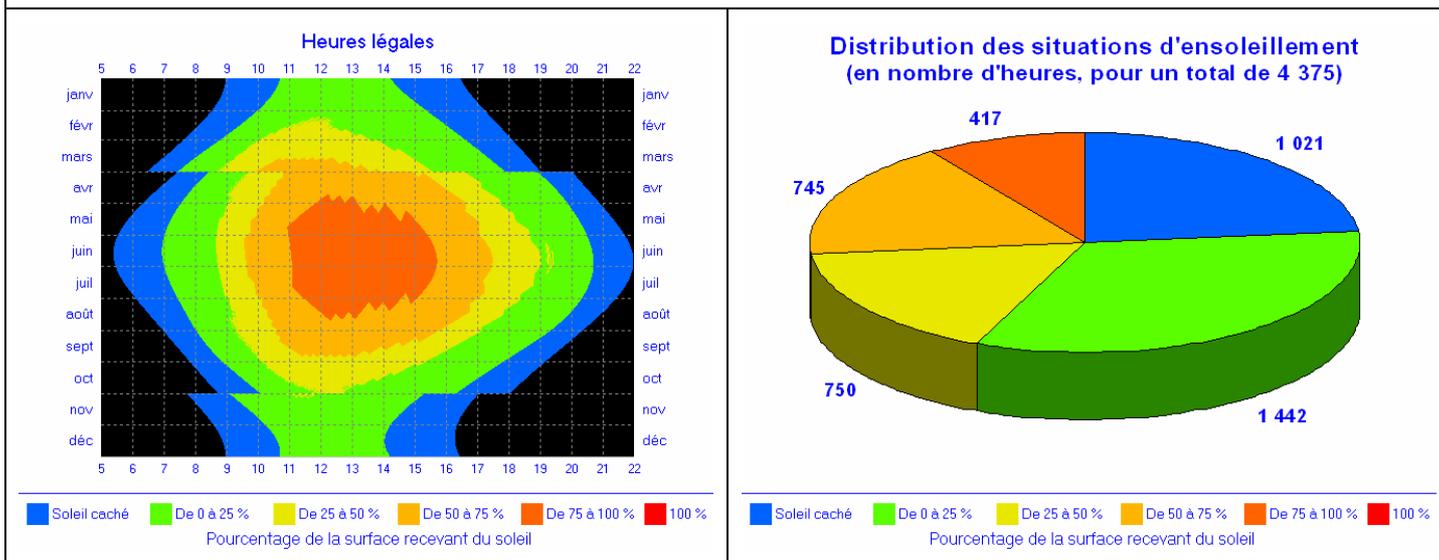
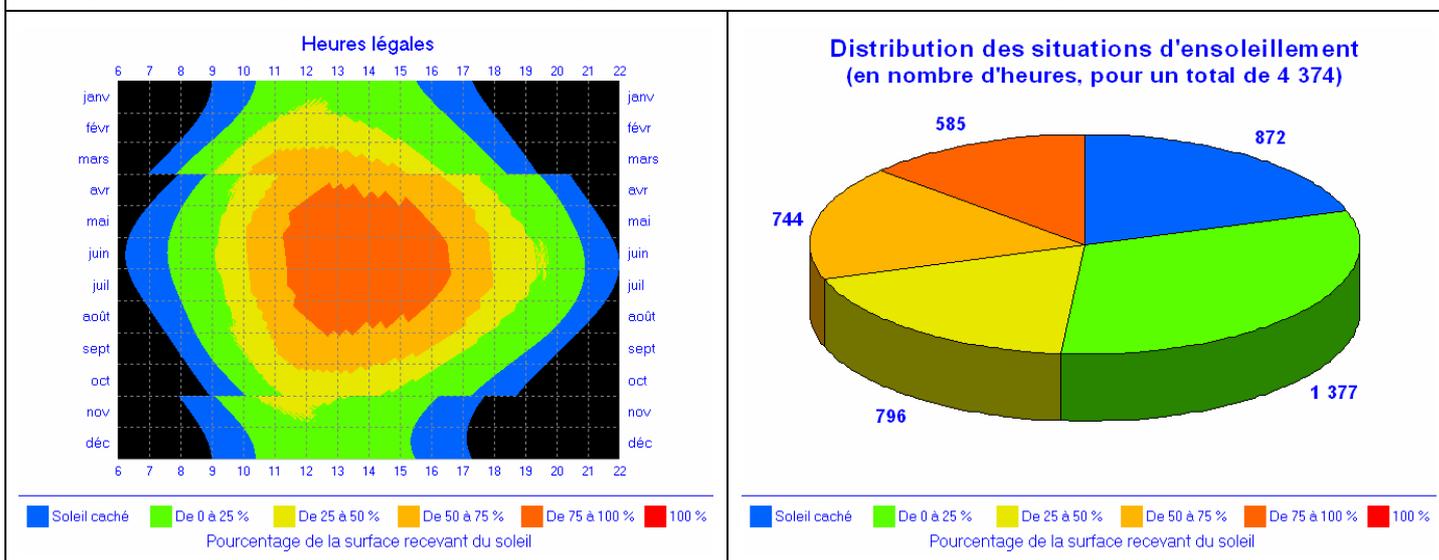


Tableau 36 : Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 13 (C13) avec l'axe longitudinale orienté nord – sud.

C13 STADE DE FOOTBALL – AMSTERDAM ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST



C13 STADE DE FOOTBALL – NANTES ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST



C13 STADE DE FOOTBALL – NICE ORIENTATION DE L'AXE : NORD-OUEST – SUD-EST

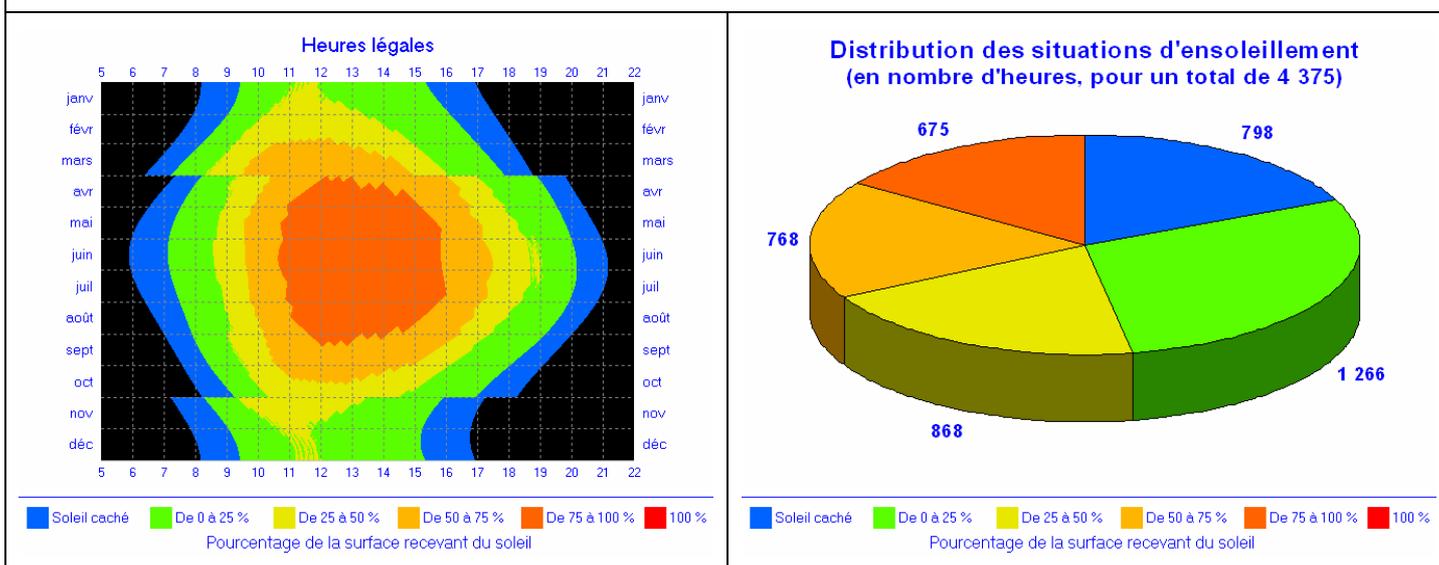


Tableau 37 : Ensoleillement de l'aire de jeu pour la configuration 13 (C13) avec l'axe longitudinale orienté nord-ouest – sud-est

Les diagrammes appartenant aux différentes configurations indiquent une variation significative des conditions lumineuses pendant l'année en fonction des paramètres étudiés : la morphologie, l'orientation et la localisation.

Les résultats des essais paramétriques d'ensoleillement de l'aire de jeu mettent en évidence que **la gêne visuelle** définie auparavant [Chapitre I 2.] **existe dans la majeure partie de l'année pour les dix configurations étudiées dans les trois localisations géographiques.**

Ils mettent en évidence également que les paramètres morphologiques, en particulier la géométrie du stade et la géométrie solaire affectent la durée des conditions d'éclairage uniforme au niveau de l'aire de jeu. De plus, il existe des corrélations entre ces paramètres morphologiques et les conditions lumineuses au niveau de l'aire de jeu.

La Figure 116 illustre un exemple de ces corrélations, en particulier l'effet de l'inclinaison de la toiture sur les conditions lumineuses dans le cas où l'axe longitudinal du stade est orienté nord-sud.

Durée de l'ensoleillement extrême de l'aire de jeu en fonction de l'inclinaison de la toiture

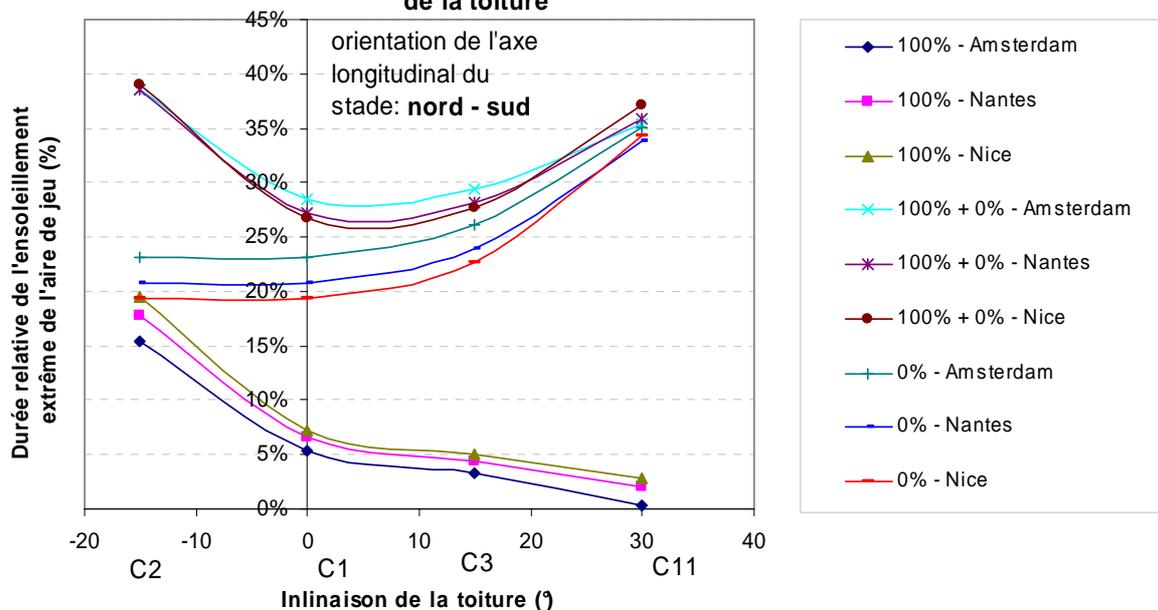


Figure 116 : L'évolution des conditions d'éclairage sur l'aire de jeu des configurations 1, 2, 3 et 11 pour des stades dont l'axe longitudinal est orienté nord-sud.

La durée d'ensoleillement annuelle est représentée sur l'ordonnée par rapport à la durée totale de la période pendant laquelle le soleil est au-dessus de l'horizon. Ce dernier équivaut pour ces trois villes à environ 4375 heures par an. L'abscisse correspond à l'inclinaison de la toiture: -15° signifie une toiture descendante vers l'aire de jeu (C2), le zéro correspond à la toiture horizontale (C1), tandis que les valeurs positives ($+15^\circ$ et $+30^\circ$) signifient des toitures montantes vers l'aire de jeu (C3 et C11).

Le premier groupe de courbes illustre que la durée dans l'année pendant laquelle l'intégralité de l'aire de jeu est ensoleillée (marqué par 100%) diminue quand l'inclinaison de la toiture vers l'aire de jeu augmente.

Le deuxième groupe de courbes indique que la durée pendant laquelle l'aire de jeu est à l'ombre (marqué par 0%) est plus longue pour une toiture montante de 30° vers l'aire de jeu et diminue avec l'inclinaison de celle-ci vers l'aire de jeu.

Le troisième groupe de courbes représente la somme des deux sortes de durées (marqué par 100% +0%) : les conditions lumineuses sont uniformes au niveau de l'aire de jeu pendant la durée la plus longue pour une toiture opaque descendante (C2). Tandis qu'elles prévalent pendant les périodes plus courtes pour des toitures horizontale (C1) et légèrement montante (C3). Cependant, des valeurs proches de celles-ci correspondant à une toiture descendante (C2) sont obtenues pour une toiture fortement inclinée montante (C11).

Ces résultats indiquent que les conditions lumineuses du point de vue de l'ensoleillement uniforme de l'aire de jeu sont aussi favorables dans le cas d'une toiture descendant vers l'aire de jeu de 15° (C2), que dans le cas d'une toiture montant vers l'aire de jeu de 30° (C11). Il faut noter cependant, que la configuration 11 (C11) avec une toiture fortement inclinée, montante implique une durée très longue pendant laquelle l'aire de jeu est à l'ombre. En revanche, une durée totale d'éclairage uniforme correspond dans le cas d'une toiture descendante à une durée longue d'ensoleillement complète de l'aire de jeu. Ceci permet de proposer, même si le sujet du travail présent concerne uniquement le confort des spectateurs, l'emploi d'une configuration à toiture descendante dans les climats chauds, où l'intégralité de l'aire de jeu est ensoleillée pendant une période relativement longue de l'année, ce qui fournit des conditions plus avantageuses pour les joueurs ou les compétiteurs. Par contre, la configuration dont la toiture monte de 30° vers l'aire de jeu, semble être plus avantageuse en climats froids puisque l'aire de jeu est à l'ombre pendant une durée annuelle considérable.

La Figure 117 montre l'évolution des conditions lumineuses en fonction de la pente de toiture pour des stades dont l'axe longitudinal est orienté nord-ouest – sud-est. La majorité des courbes montre un caractère identique à celles du cas précédent. Cependant un changement considérable peut être observé pour la configuration 3 (C3) qui comporte une toiture montant de 15° vers l'aire de jeu. L'aire de jeu de cette configuration semblablement à la configuration 11 (C11) est à l'ombre pendant environ 32% de période totale diurne. Ceci fait évidemment augmenter la durée annuelle pendant laquelle l'éclairage est uniforme au niveau de l'aire de jeu.

Cette configuration avec une telle orientation semble être avantageuse en climats chauds, où l'ombre est appréciée non seulement au niveau des gradins, mais aussi au niveau de l'aire de jeu.

Durée de l'ensoleillement extrême de l'aire de jeu en fonction de l'inclinaison de la toiture

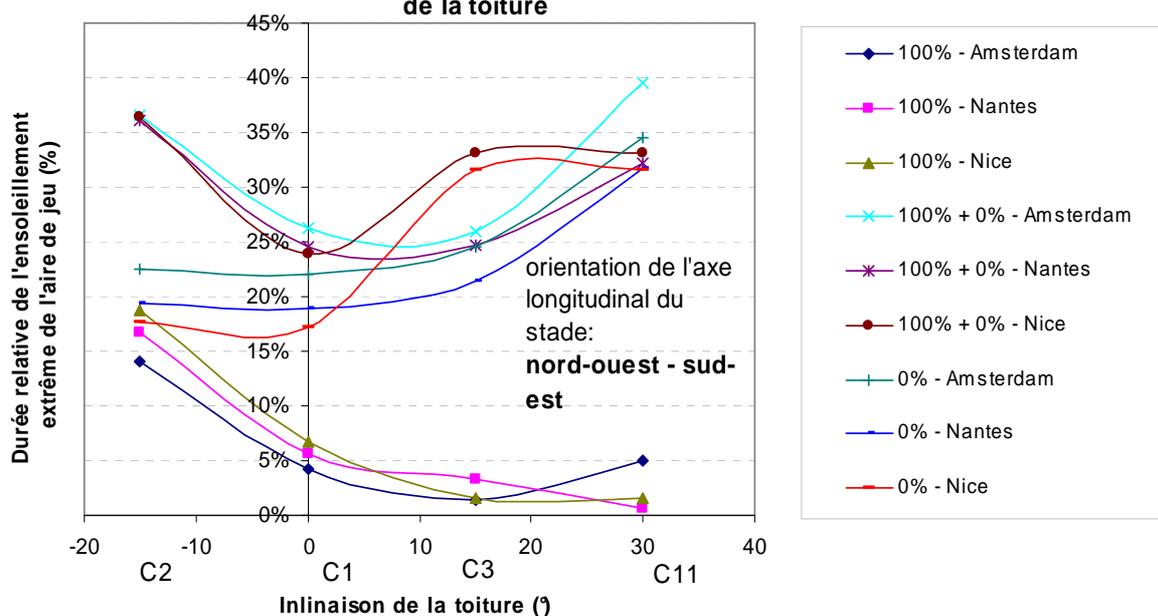


Figure 117 : L'évolution des conditions d'éclairage sur l'aire de jeu des configurations 1, 2, 3 et 11 pour des stades dont l'axe longitudinal est orienté vers nord-ouest – sud-est.

L'analyse préalable de l'ensoleillement de l'aire de jeu permet de modifier les caractéristiques morphologiques du stade, ou les caractéristiques photométriques de la couverture de la toiture ou bien l'orientation du stade afin d'atteindre une ambiance lumineuse qui soit confortable pour les spectateurs.

3.2. MÉTHODE DE DÉTERMINATION DE LA MORPHOLOGIE PHOTOMÉTRIQUE DE LA TOITURE

Le critère de confort visuel des spectateurs, notamment l'éclairage uniforme au niveau de l'aire de jeu est rarement accompli dans les stades qui comportent une toiture opaque. L'ombre portée de la toiture projetée sur l'aire de jeu ensoleillé crée un contraste accentué qui gêne non seulement les spectateurs, mais encore les téléspectateurs et les joueurs. Le problème est bien illustré par l'exemple suivante : la trajectoire du ballon peut être difficilement suivie lorsque celui-ci passe d'une zone ombrée à une zone ensoleillée de l'aire de jeu.

La problématique de l'éclairage de l'aire de jeu en lumière du jour a été abordée par un logiciel qui a permis de démontrer l'existence des corrélations entre les paramètres morphologiques et l'ensoleillement de l'aire de jeu. Il a également permis d'illustrer l'effet de l'orientation du stade et la localisation géographique.

Il ne permet cependant pas de déterminer préalablement la localisation des zones de différentes caractéristiques photométriques de toiture pour que l'aire de jeu soit uniformément ensoleillée ou éclairée [Szucs *et al.*, 2005(3)].

Un outil présenté dans le Chapitre II, l'horizontoscope sert notamment à l'étude de l'ensoleillement d'un point d'une localisation géographique donnée [Chapitre II. 5].

Ainsi en prenant les quatre coins de l'aire de jeu, l'ensoleillement de l'intégralité de l'aire de jeu peut être analysé.

L'horizontoscope placé en un coin de l'aire de jeu illustre, si on l'utilise avec la maquette élaborée pour les études en soufflerie, la partie de l'année pendant laquelle

- o le coin est à l'ombre des gradins;
- o le coin est à l'ombre de la toiture (en matériau transparent),
- o le coin est ensoleillé.

La Figure 118 montre les contours principaux du stade ceux qui balisent ces différentes zones.

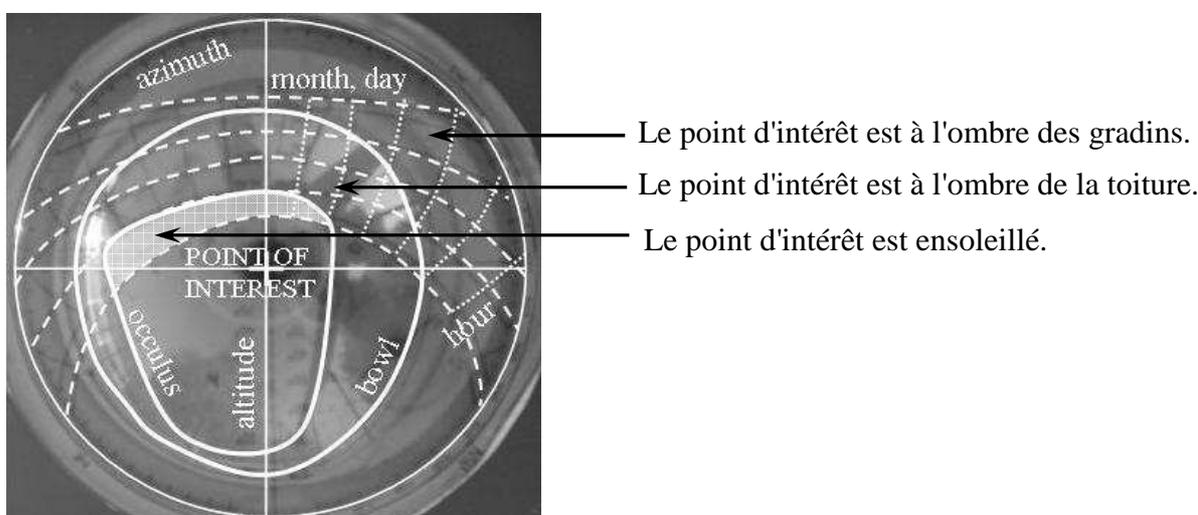


Figure 118 : Image du stade projetée sur l'horizontoscope

Evidemment l'intégralité de la toiture pourrait être transparente même si cela n'est pas nécessaire du point de vue du confort visuel des spectateurs. En climats froids une toiture transparente est avantageuse puisqu'elle permet que les spectateurs soient exposés au rayonnement solaire direct, ce qui peut compenser l'effet des basses températures. Cependant en climats chauds, le rayonnement solaire direct peut conduire à des conditions thermiques pénibles pour les spectateurs, surtout si le rayonnement direct intensif est couplé à un mouvement d'air restreint. Cette situation peut également apparaître en climats tempérés pendant la période estivale.

Ainsi en climats chauds et tempérés il est nécessaire de concevoir la morphologie photométrique de la toiture, ce qui permet d'obtenir des conditions visuelles confortables qui ne s'opposent pas aux exigences de confort aérothermique.

La question de localisation des différentes zones de la toiture, notamment transparentes et opaques est abordée par les situations plausibles d'ensoleillement de l'aire de jeu :

- La première situation d'ensoleillement est lorsque les quatre coins de l'aire de jeu sont ensoleillés, en conséquence l'intégralité de l'aire de jeu est ensoleillée.

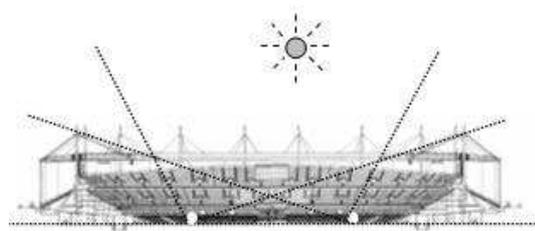


Figure 119 : L'intégralité de l'aire de jeu est ensoleillée

Cette scénario d'ensoleillement est probable dans les localisations à faible latitude pendant la période estivale vers midi, pourvu qu'un objet voisin (un élément du stade ou un élément extérieur) ne projette pas d'ombre sur l'aire de jeu.

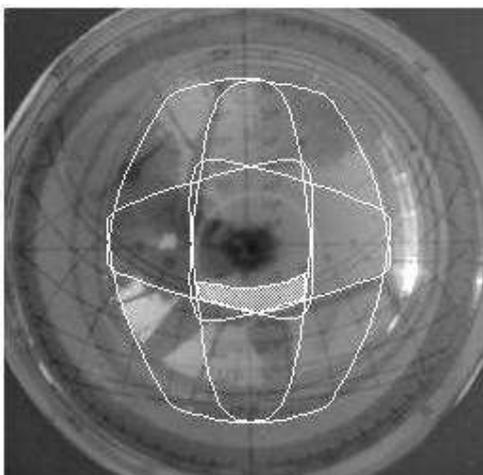


Figure 120 : Première situation : l'intégralité de l'aire de jeu est ensoleillée

Le diagramme solaire de la Figure 120 illustre sous forme d'intersection des contours de l'oculus - vu des quatre coins de l'aire de jeu – les dates et les heures pendant lesquelles l'intégralité de l'aire de jeu est ensoleillée.

L'intersection des contours de l'oculus représente la période dans l'année pendant laquelle l'intégralité de l'aire de jeu est ensoleillée. La période est marquée par la surface de zone blanche sur le diagramme solaire.

- Le deuxième cas illustre une situation où l'intégralité de l'aire de jeu est ombragée par les gradins, en d'autres termes les points d'intérêt ne recevront pas de rayonnement solaire direct.

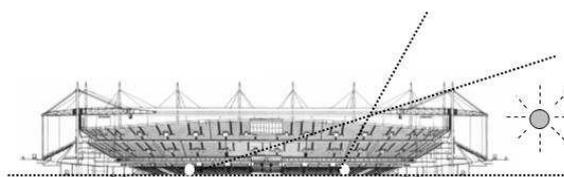


Figure 121 : L'intégralité de l'aire de jeu est à l'ombre des gradins

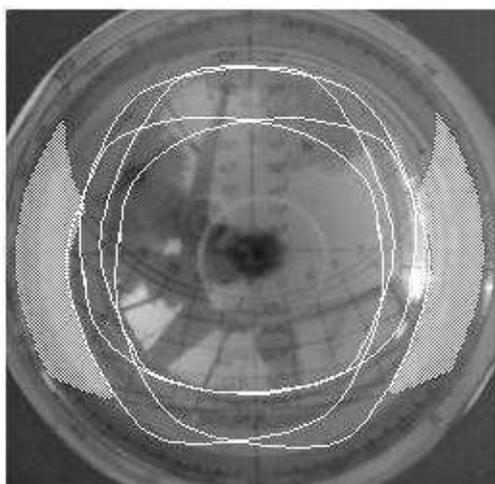


Figure 122 : La zone blanche, représente la période pendant laquelle les gradins projettent de l'ombre sur l'aire de jeu.

- Au moins un coin de l'aire de jeu (mais pas tous) est ombré par la toiture. Pour un stade symétrique et de hauteur constante, les autres coins sont ensoleillés.



Figure 123 : L'aire de jeu est partiellement ensoleillée : situation de combinaison du rayonnement directe et de l'ombre.

Dans cette situation, le critère de confort visuel évoqué dans le Chapitre I, notamment l'ensoleillement uniforme de l'intégralité de l'aire de jeu sans contraste peut être atteint à condition que ces parties de la toiture qui représentent un obstacle pour le rayonnement solaire direct et projettent de l'ombre sur l'aire de jeu, soient transparentes.

La détermination de la durée maximale d'ensoleillement en un point est expliqué par l'exemple suivant :

L'axe longitudinale du stade est orienté nord-sud. L'horizontoscope est placé dans le coin sud-ouest de l'aire de jeu. L'image du stade réfléchi par l'horizontoscope illustre le contour extérieur de la toiture et également son contour intérieur. Le contour intérieur est en d'autres termes de contour de l'oculus.

La Figure 124 illustre l'intersection de la zone déterminée par ces contours, avec le diagramme solaire et représente la période de l'année pendant laquelle le coin sud-ouest est ombré par la toiture opaque.

Pourvu que cette partie de la toiture soit transparente, le coin en question recevra du rayonnement solaire direct. Le niveau de ce dernier varie selon la transmissivité du matériau de couverture de la toiture.

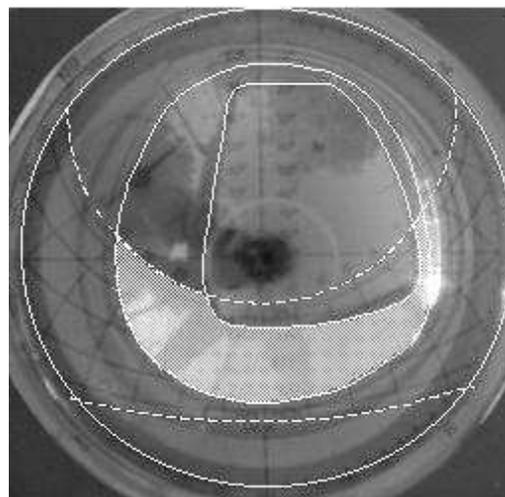


Figure 124 : La zone blanche représente sur le diagramme solaire la période de l'année pendant laquelle le coin sud-ouest sera ensoleillé.

Un procédé identique doit être appliqué pour chaque coin de l'aire de jeu. Ainsi, la zone transparente de la toiture peut être définie en additionnant les zones transparentes correspondant à chaque coin. Le mode de fonctionnement du stade défini par le propriétaire peut permettre certains compromis concernant la surface de ces zones : dans le cas où aucun événement ne se déroulerait dans le stade avant par exemple 9 heures du matin, c'est la ligne correspondant à 9 heures du matin du diagramme solaire qui détermine le bord de la zone transparente. La localisation de la zone transparente de la toiture peut être définie à partir de l'image vue sur l'horizontoscope et projetée sur le diagramme solaire.

- Au moins un des coins, mais pas tous, est à l'ombre des gradins. Dans ce cas il est probable que, outre l'ombre des gradins, l'ombre de la toiture apparaisse également sur l'aire de jeu. Le but recherché est d'éviter un contraste accentué sur l'aire de jeu.

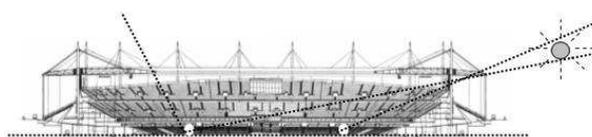


Figure 125 : Quatrième scénario de l'ensoleillement : l'ombre des gradins et de la toiture est projetée sur l'aire de jeu.

Dans cet esprit, les gradins étant opaques, il semble nécessaire que les autres coins soient à l'ombre également. Ceci peut être obtenu par l'emploi d'un matériau opaque comme couverture de la toiture. Un processus identique, mais complémentaire au cas précédent doit alors être appliqué.

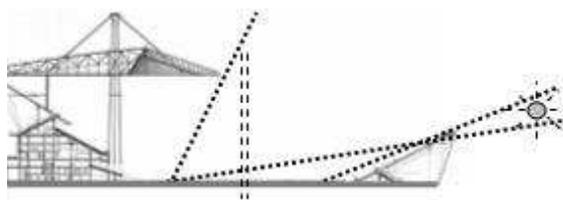


Figure 126 : Cinquième scénario : un coin de l'aire se trouve à l'ombre des gradins, un autre est ensoleillé.

- Il ne peut pas être exclu qu'une situation combinée apparaisse où un coin de l'aire de jeu se trouve à l'ombre des gradins et un autre est ensoleillé. Concernant les configurations du stade analysées dans le cadre de ce travail, cette situation d'ensoleillement n'est pas à prendre en compte car elle n'apparaît que dans les stades asymétriques.

L'exemple suivant illustre les quatre images qui apparaissent sur la lentille de l'horizontoscope correspondant à chaque coin de l'aire de jeu. Les images sont projetées sur le diagramme solaire et superposées l'une sur l'autre. Le diagramme solaire correspond à latitude 47° de l'hémisphère nord et la configuration choisie est le C1, avec une toiture horizontale.

La zone blanche de la Figure 127 qui représente l'intégrale des zones transparentes appartenant à chaque coin, illustre la surface transparente de toiture qui permet un ensoleillement uniforme au niveau de l'aire de jeu.

Si aucun événement ne se déroule avant 10 heures du matin, la zone transparente correspondant aux heures matinales inférieures à 10 heures peut être opaque. Cette zone opaque est repérée par la ligne qui marque 10 heures sur le diagramme solaire et par le contour extérieur de toiture. Elle est marquée par un contour noir sur la Figure 127. A partir de ces contours la localisation des différents segments de la toiture, en d'autres termes sa morphologie photométrique peut être déterminée.

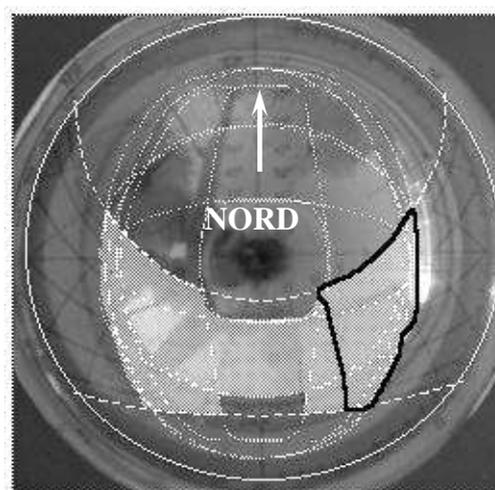


Figure 127 : Détermination des secteurs transparents (zone blanche) et opaques (zone blanche de contour noire) de la toiture

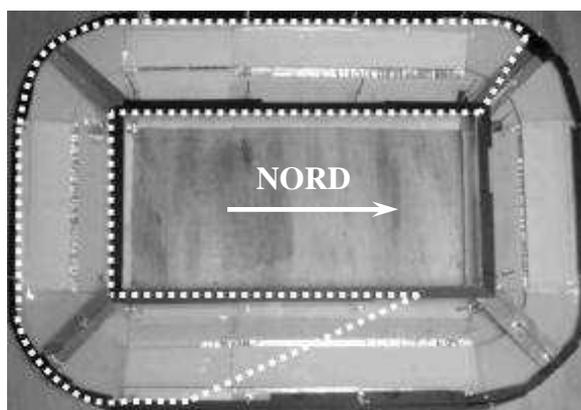


Figure 128 : Zone transparente de toiture marquée par la ligne pointillée et déterminée par l'horizontoscope

La course du soleil varie en fonction de la localisation géographique, en conséquence la distribution et l'aire de ces zones varient également avec celle-ci.

De plus, l'orientation du stade modifie également l'emplacement et l'étendue de ces zones. La Figure 129 montre l'effet de l'orientation sur l'ensoleillement d'un point choisi.

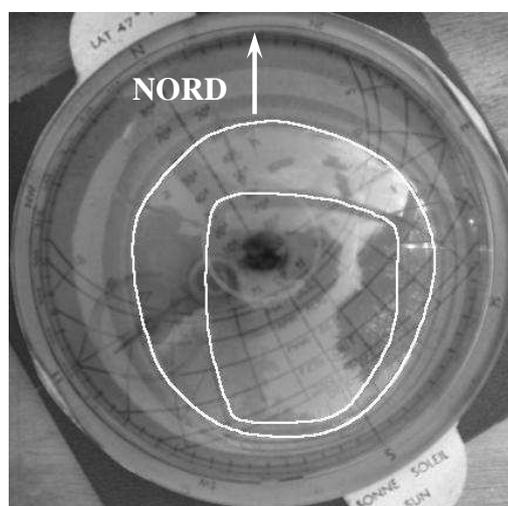


Figure 129 : Contours de l'oculus et des gradins projetés sur l'horizontoscope d'un stade dont l'axe longitudinal est orienté de 30° vers l'ouest par rapport au nord. Le diagramme solaire correspond à la latitude 47° nord.

Cette méthode permet de localiser des zones de caractéristique photométrique différentes afin d'atteindre un ensoleillement total ou nul au niveau de l'aire de jeu.

Outre des matériaux transparents et opaques la toiture peut également être couverte par des matériaux translucides ou opalescents. Ces matériaux présentent la caractéristique photométrique favorable de diffuser la lumière dans toutes les directions de l'espace [Chapitre I. 2]. Ceci permet d'avoir un niveau d'éclairage relativement important pourvu que les conditions météorologiques soient favorables. Les matériaux translucides et opalescents permettent ainsi d'atténuer le contraste dû aux ombres portées de la structure de toiture.

4. METHODOLOGIE DE TRANSPOSITION DES RESULTATS DES ESSAIS MENEES EN SOUFFLERIE AUX CAS REELS

4.1 DONNEES CLIMATIQUES DU SITE D'IMPLANTATION ET DONNEES CARACTERISTIQUES DU STADE

Les résultats des essais paramétriques sont transposables aux cas réels, ils permettent ainsi d'évaluer le confort aérothermique des spectateurs d'un stade particulier d'un site bien défini dans la phase de conception du projet.

Pour cela il est nécessaire de connaître :

- **les caractéristiques aérodynamiques du stade** (liés à la morphologie architecturale) qui sont décrits par les indices adimensionnels ($\bar{\Psi}$, $\Psi_{10\%}$, $\Psi_{90\%}$) définis en Chapitre II. Les valeurs de $\bar{\Psi}$ permettent de caractériser dans le cadre d'une analyse globale, les conditions aérodynamiques "moyennes" au niveau de l'intégralité des tribunes. En revanche, les valeurs de $\Psi_{10\%}$ et $\Psi_{90\%}$ caractérisent les conditions aérodynamiques uniquement dans les zones concernées par ces valeurs.
- **les données climatiques du site d'implantation,**

notamment

- **Les données de température extérieure**, plus précisément la distribution des valeurs moyennes sur une heure pour la période d'utilisation du stade définie par le maître d'ouvrage (exemple : la période d'utilisation peut être définie comme une période de l'année et/ou une période de la journée). Ces données seront associées aux vitesses du vent prévalant au niveau des tribunes, ce qui permet de classer la situation (déterminée par les paires température et vitesse) "inconfortable" ou "confortable" selon la zone de confort définie dans le Chapitre II.
- **Les données du vent**, notamment la vitesse moyenne mesurée sur une heure par secteur pour la période d'utilisation du stade définie par le maître d'ouvrage. Les données du vent comprennent également les données de calme (les périodes sans vent).

Les données du vent permettent de recalculer la vitesse de l'écoulement et son écart-type correspondant aux différentes variantes de Ψ ($\bar{\Psi}$, $\Psi_{10\%}$, $\Psi_{90\%}$) au niveau des tribunes, en tenant compte la rugosité du site d'implantation.

Ces données peuvent éventuellement être complétées par les données mensuelles du rayonnement solaire liées aux données mensuelles de la température extérieure. Le premier signifie la somme journalière d'irradiation globale sur un plan horizontal pour un jour représentatif par mois pour la période d'utilisation. Ceci permet de calculer l'intensité du rayonnement sur une surface d'orientation et de position donnée pour un instant choisi de la journée. L'intensité du rayonnement liée à la température indique si le rayonnement a une rôle compensatoire et contrebalance l'effet des

températures basses ou signifie plutôt une charge thermique lorsqu'elle est associée aux températures élevées.

Les données géographiques du site (latitude, longitude) ce qui permet de calculer l'ensoleillement de l'aire de jeu et ainsi obtenir de l'information sur le confort visuel.

Dans le cas où les données du vent représentent des caractéristiques régulières dus aux phénomènes mézo- ou microclimatiques (mer – continent, montagne – vallée etc.), elles doivent être confrontées à la période d'utilisation.

Il ne peut pas être exclue que la fréquence d'occurrence de différents intervalles de la température et du vent soient corrélées, en d'autres termes, que la température et le vent ne soient pas des variables aléatoires indépendantes. Si il existe de corrélation entre ces variables, elle doit être pris en compte.

4.2 CHOIX PRÉLIMINAIRE DES CONFIGURATIONS DU STADE

Dans un premier temps, plusieurs configurations sont présélectionnées pour un site d'implantation bien défini d'une part sur la base des **aspects fonctionnels** (exemple : stade de football avec ou sans piste d'athlétisme), et d'autre part à partir des **aspects de sécurité** (évacuation, séparation de spectateurs des équipes adversaires). Au-delà de ces aspects, **le choix est en grande partie déterminé par le comportement de l'écoulement au sein du stade, en particulier au niveau des tribunes - le vent étant un facteur climatique modifiable dans un large mesure par la morphologie du stade**. Le choix est également influencé par les **exigences de confort visuel par rapport à la lumière du jour**, qui est basé sur les conditions lumineuses homogènes au niveau de l'aire de jeu. Concernant le confort acoustique, le but est plutôt d'atteindre un bon niveau d'intelligibilité par les traitements des surfaces, que de créer une ambiance "effervescente" pour les spectateurs, d'autant plus que ces exigences sont opposées.

Après avoir sélectionné les configurations adéquates du point de vue des fonctions et de la sécurité, un **choix préliminaire est effectué à partir des données de champs de vitesse dans le stade au niveau des tribunes, obtenus au cours des essais paramétriques en soufflerie**.

En général, pour les climats froids où le but est de réduire les échanges aérothermiques entre les spectateurs et l'environnement, les configurations comportant une capacité protectrice importantes sont favorisées. Par contre, en climats chauds, où l'échange aérothermique entre les spectateurs et l'environnement doit être augmenté, les configurations dont les tribunes sont fortement ventilées sont avantageuses. (Il est nécessaire de préciser qu'au-delà d'environ 37°C le mouvement de l'air signifie une charge thermique sur l'individu due aux échanges convectifs, même si les échanges évaporatifs sont augmentées dans un milieu non saturé [Auliciems 1997].)

Quant aux climats continentaux, les configurations comportant des caractéristiques aérauliques intermédiaires, en d'autres termes ni trop intensivement ventilées, et ni trop protégées du vent peuvent fournir une solution. Toutefois, pour toutes sortes de climats, les configurations dont la ventilation au niveau des tribunes est homogène sont privilégiées.

La qualité aérodynamique du stade est évaluée à partir de valeurs de Ψ prédéfinies [Chapitre II.3.], notamment :

- la valeur moyenne de la population de Ψ : $\overline{\Psi}$;
- le premier décile de la population de Ψ : $\Psi_{10\%}$
- le dernier décile de la population de Ψ : $\Psi_{90\%}$;

et par les rapports de ces variantes de Ψ qui définissent l'étendue des données de chaque population pour chaque configuration et pour chaque incidence, et à la fois la homogénéité de l'écoulement :

- l'indice IH 10%, qui est égal au rapport de premier décile et de la valeur moyenne de Ψ :

$$IH10\% = \frac{\Psi_{10\%}}{\overline{\Psi}},$$

- l'indice IH 90%, qui égale au rapport de premier décile et de la valeur moyenne de Ψ :

$$IH90\% = \frac{\Psi_{90\%}}{\overline{\Psi}} \text{ [Chapitre II.3.]}$$

Les configurations présélectionnées sont à **orienter** sur le site donné.

En ce qui concerne l'orientation du stade, il est recommandé de suivre les exigences selon la fonction du stade définies par les réglementations architecturales [John *et al.*, 2000] et de les harmoniser par les caractéristiques du site d'implantation (forme, dimension, orientation etc.).

Une configuration qui présente les caractéristiques aérodynamiques défavorables pour une seule incidence du vent, ne doit pas être exclue a priori de l'analyse, puisque pour une position géographique définie, il est possible que la fréquence d'occurrence de vents de l'incidence "critique" soit moins importante, voir négligeable.

Après avoir choisi l'orientation, **la position des axes principaux du stade est à relier aux points cardinaux**. Les axes principaux du stade signifient les incidences du vent pour lesquelles la maquette a été étudiée en soufflerie au cours des essais paramétriques :

- longitudinal, incidence du vent parallèle à l'axe longitudinal du stade;
- diagonal, incidence du vent formant un angle de 30° par rapport à l'axe longitudinal du stade;
- transversal, incidence du vent perpendiculaire à l'axe longitudinal du stade.

La Figure 130 illustre que ces axes coïncident rarement avec les axes cardinaux.

Les données du vent sont réparties par rapport au nord. Selon la pratique, elles sont présentées par 20° ou par 30°, ainsi le tableau de contingence contient en total 18 ou 20 secteurs. La fréquence d'occurrence (annuelle, saisonnière etc.) des vents en fonction leur vitesse et direction est indiquée par le rose des vents.

Les secteurs dans lesquels les axes se trouvent sont à définir. La Figure 130 illustre, qu'il existe toujours des secteurs qui contiennent les axes du stade et il existe également des secteurs qui ne contiennent aucun axe.

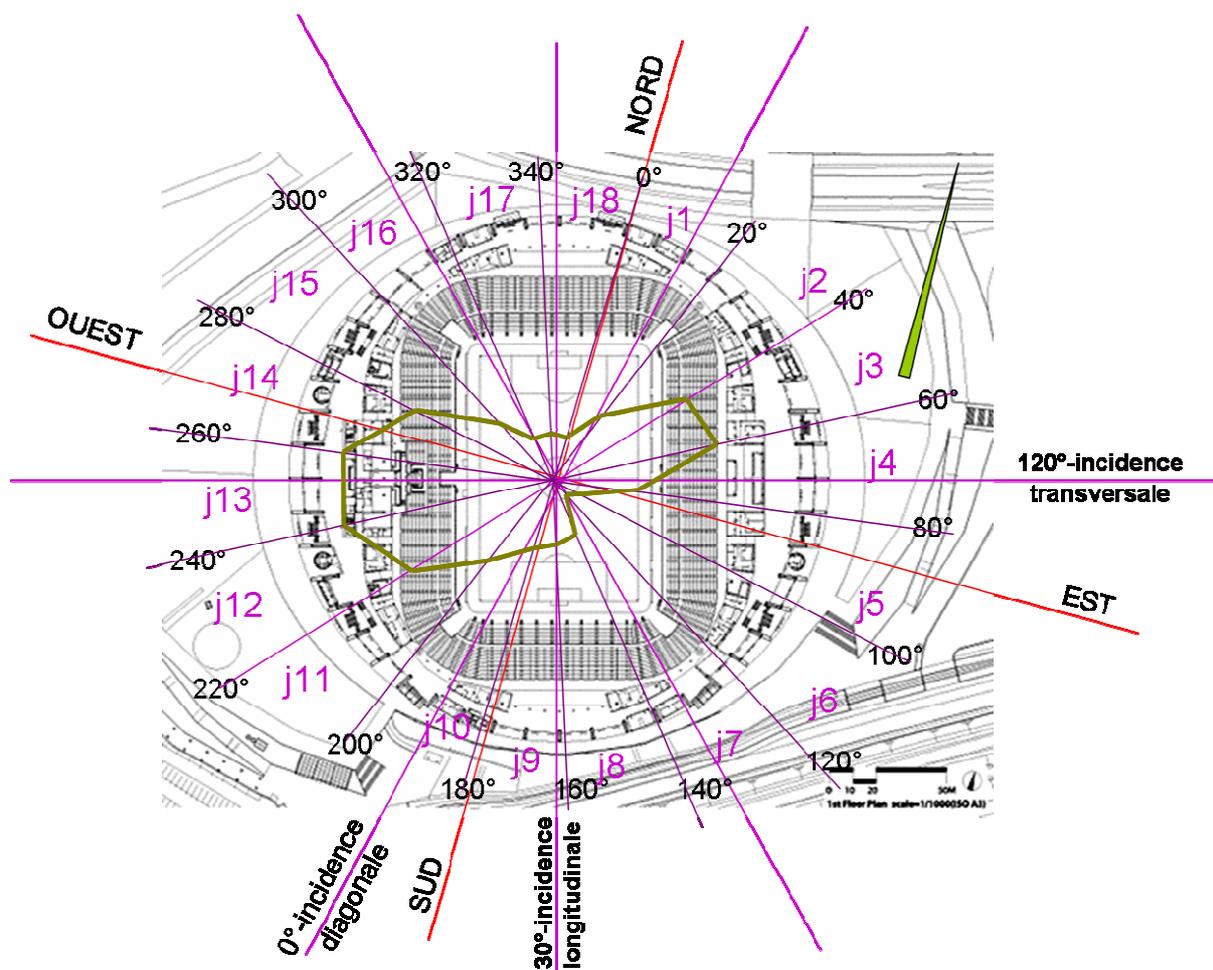


Figure 130 : Secteurs de rose des vents superposés au plan du stade

Les données qui caractérisent l'écoulement (variations de Ψ) des secteurs contenant un axe, sont directement transposables des mesures menées en soufflerie. Cependant, celles correspondant aux secteurs qui ne contiennent aucun axe, doivent être interpolées à partir des données des secteurs qui les jouxtent. Ce processus est à répéter pour chaque configuration.

Ainsi, à chaque secteur trois valeurs caractéristiques de Ψ sont associées : $\bar{\Psi}$; $\Psi_{10\%}$; $\Psi_{90\%}$.

Néanmoins, les valeurs de ces indices restent relatives tant qu'elles ne sont pas associées à la fréquence d'occurrence des différents niveaux de vitesse du vent.

Au cours d'une analyse exhaustive, il est nécessaire de considérer chaque secteurs et chaque niveau de vitesse du vent, y compris les vitesses moins élevées, voire le calme. Le mouvement d'air restreint couplé par les températures élevées représentent une source de risque de l'inconfort aérothermique en particulier en climat chaud [Fiala *et al.*, 1999].

En revanche, en conditions froides les échanges thermiques entre l'individu et l'environnement sont augmentés par le vent et par des températures basses, ce qui peut induire l'inconfort thermique et mécanique chez les spectateurs.

4.3 RECALAGE CLIMATIQUE DES DONNEES METEOROLOGIQUES

Les résultats des essais en soufflerie sont présentés sous la forme des plans de caractère cartographique constitués des isovaleurs de coefficient Ψ [Chapitre II. 3.]. L'indice exprime la vitesse et son écart-type d'un point i au niveau des tribunes, par rapport à ceux d'un point de référence. Ce dernier se trouve en zone dégagée en amont du stade à 2 mètres de hauteur [Chapitre II.3.].

Ces résultats peuvent être transposées aux cas réels à travers d'un recalage des données climatiques entre la station météorologique la plus proche du site et le site d'implantation du stade. Dans le cas où la station météorologique voisine n'est pas représentative, une étude climatique approfondie du site s'impose [Gandemer et Guyot, 1976].

A la station météorologique la vitesse moyenne à la hauteur de 10 mètres ($\bar{U}_{10\text{météo}}$) et celle à une hauteur z_1 choisie ($\bar{U}_{z_1\text{météo}}$) sont simultanément mesurées. La hauteur z_1 est choisie de façon qu'elle soit adaptée au mieux à la nature de l'environnement proche et qu'elle soit suffisamment haute, en zone dégagée de la rugosité du site. La mesure simultanée de vitesse du vent à ces hauteurs permet de définir expérimentalement le coefficient de recalage K , et également de calculer la vitesse moyenne à la hauteur z_1 sur le site d'implantation [Equation 26] :

$$\bar{U}_{z_1\text{site}} = K \bar{U}_{10\text{météo}} \quad \text{[Équation 26]}$$

Même si le recalage expérimental est préférable, pour différentes raisons (coûts, délai etc.) on procède souvent à un recalage théorique du site en utilisant les profils définis par l'Eurocode [Eurocode Partie 2-4, 1995]:

$$\bar{U}_{z_1} = k \cdot \ln \frac{z_1}{z_0} \cdot \bar{U}_{10\text{météo}} \quad \text{[Équation 27]}$$

Cela conduit à définir un coefficient de transfert entre la station météorologique et le site d'implantation du stade :

$$K_1 = k \cdot \ln \frac{z_1}{z_0} \quad \text{[Équation 28]}$$

On définit une vitesse de référence à la hauteur z_1 pour s'affranchir des effets d'environnement dans le cadre de l'expérimentation. Les vitesses à la hauteur z_1 ($\bar{U}_{z_1\text{site}}$) et au point de référence (\bar{U}_{ref}) à la hauteur de 2 mètres en amont du stade sont liées par le coefficient K_2 :

$$\bar{U}_{ref\text{site}} = K_2 \cdot \bar{U}_{z_1\text{site}} \quad \text{[Équation 29]}$$

Ainsi, le coefficient Ψ peut s'exprimer en fonction de la vitesse à la station météorologique et des caractéristiques du vent sur le site d'implantation du stade :

$$\Psi_i = \frac{\bar{U}_i + \sigma_i}{\bar{U}_{ref} + \sigma_{ref}} \quad \text{[Équation 30]}$$

où \bar{U}_i et σ_j sont respectivement la valeur moyenne et l'écart type de la vitesse du vent dans un point i aux niveaux des tribunes, et \bar{U}_{ref} et σ_{ref} sont les valeurs homologues mesurées à la hauteur z_{ref} (2 mètres) en amont du stade en zone dégagée.

Le coefficient Ψ peut être défini en employant l'intensité de turbulence :

$$I_{ref} = \frac{\sigma_{ref}}{\bar{U}_{ref}} \quad \text{[Équation 31]}$$

où I_r est l'intensité de turbulence à la référence.

$$\Psi_i = \frac{\bar{U}_i + \sigma_i}{\bar{U}_{ref} + \sigma_{ref}} = \frac{\bar{U}_i + \sigma_i}{\bar{U}_{ref} \cdot (1 + I_{ref})} = \frac{\bar{U}_i + \sigma_i}{K_2 \cdot \bar{U}_{z_{site}} \cdot (1 + I_{ref})} = \frac{\bar{U}_i + \sigma_i}{K_1 \cdot K_2 \cdot \bar{U}_{10météo} (1 + I_{ref})} \quad \text{[Équation 32]}$$

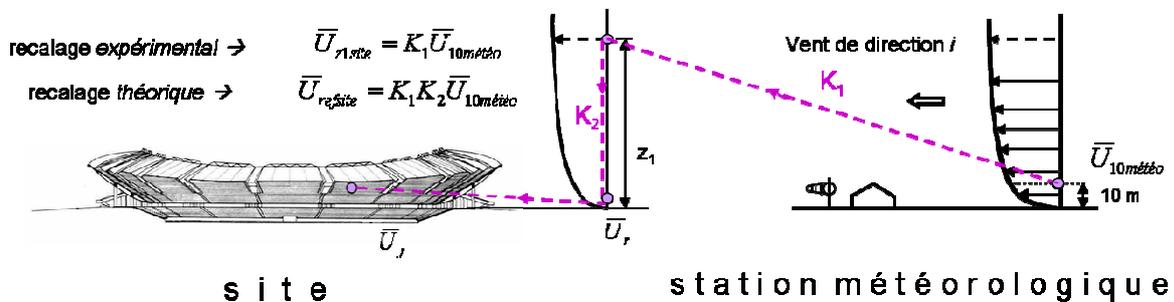


Figure 131 : Les étapes de recalage du site par rapport à la station météorologique

En remplaçant $K_1 \cdot K_2$ par K par on obtient :

$$\Psi_i = \frac{\bar{U}_i + \sigma_i}{K \cdot \bar{U}_{10météo} (1 + I_{ref})} \quad \text{[Équation 33]}$$

K_1 est mesuré sur site ou évalué théoriquement et K_2 et I_{ref} sont mesurés à la référence, sur le terrain ou en soufflerie.

Pour l'évaluation du confort aérothermique des spectateurs, on procède par le recalage du site par rapport à la station météorologique.

4.4 ÉVALUATION DU CONFORT AÉROTHERMIQUE SUR LA BASE DE LA TEMPERATURE ET DU MOUVEMENT DE L'AIR

L'effet couplé du vent et de la température est évalué d'une part à partir des données climatiques du site d'implantation du stade et d'autre part, à partir des caractéristiques aérodynamiques de chaque configuration du stade étudiée en soufflerie.

Les caractéristiques aérodynamiques décrits par les variations de l'indice Ψ permettent la transposition des résultats obtenus en soufflerie aux cas réels. Le Tableau 38 illustre les **données climat- et stade-spécifiques** requises pour la transposition :

- **la fréquence d'occurrence des différents niveaux de vitesses du vent** mesurés à la station météorologique à la hauteur de 10 mètres ($\overline{U}_{10\text{météo}}$) en différents secteurs ($P_{j=1,2,3\dots}$), groupées en différents intervalles ($P_{k=1,2,3\dots}$);
- **la fréquence d'occurrence des différentes Températures de Bulbe Sec** groupées en différents intervalles et décrites par la valeur moyenne de ces intervalles ($P_{i=1,2,3\dots}$);
- **le coefficient de recalage C , qui lie la vitesse à la station météorologique** mesurée à la hauteur de 10 mètres ($\overline{U}_{10\text{météo}}$) **et les caractéristiques du vent au point de référence**, notamment la somme de la vitesse moyenne et son écart ($\overline{U}_{ref} + \sigma_{ref}$);
- **les valeurs caractéristiques de Ψ pour chaque secteur;**
- **les conditions aérauliques**, notamment la somme de la vitesse moyenne et son écart type ($\overline{U}_i + \sigma_i$) **au niveau des tribunes** (donc auxquelles les spectateurs sont exposés) obtenus à partir des valeurs caractéristiques de Ψ pour chaque secteur;

Le Tableau 38 contient i intervalles de Température de Bulbe Sec, k intervalles de vitesse du vent et j secteurs. Il possède au total $j+1$ secteurs, où le $+1$ correspond à la fréquence d'occurrence de calme du vent.

Numéro et nom de la configuration du stade :							
Valeur de coefficient C :							
Secteur (°)	Vitesse du vent à la station météorologique : $\bar{U}_{10\text{météo}}$ (m/s)	Valeur caractéristique de ψ (Exemple : $\bar{\Psi}$)	Conditions caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes (m/s): $\bar{U} + \sigma$	Température de Bulbe Sec (°C)			
				(-8)– (-4) $i=1$	(-4)–0 $i=2$	0–4 $i=3$	4–8 $i=4$
$j=1$ 0–20	$k=1$ 0–2	$\bar{\Psi}_1$	$(\bar{U} + \sigma)_{11}$	$P_{i=1} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=1}$	$P_{i=2} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=1}$	$P_{i=3} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=1}$	$P_{i=4} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=1}$
	$k=2$ 2–4		$(\bar{U} + \sigma)_{12}$	$P_{i=1} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=2}$	$P_{i=2} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=2}$	$P_{i=3} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=2}$	$P_{i=4} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=2}$
	$k=3$ 4–6		$(\bar{U} + \sigma)_{13}$	$P_{i=1} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=3}$	$P_{i=2} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=3}$	$P_{i=3} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=3}$	$P_{i=4} \cdot P_{j=1} \cdot P_{k=3}$
	etc.						
$j=2$ 20–40	$k=1$ 0–2	$\bar{\Psi}_2$	$(\bar{U} + \sigma)_{21}$	$P_{i=1} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=1'}$	$P_{i=2} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=1'}$	$P_{i=3} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=1'}$	$P_{i=4} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=1'}$
	$k=2$ 2–4		$(\bar{U} + \sigma)_{22}$	$P_{i=1} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=2'}$	$P_{i=2} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=2'}$	$P_{i=3} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=2'}$	$P_{i=4} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=2'}$
	$k=3$ 4–6		$(\bar{U} + \sigma)_{23}$	$P_{i=1} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=3'}$	$P_{i=2} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=3'}$	$P_{i=3} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=3'}$	$P_{i=4} \cdot P_{j=2} \cdot P_{k=3'}$
	etc.						
$j=3$ 40–60	$k=1$ 0–2	$\bar{\Psi}_3$	$(\bar{U} + \sigma)_{31}$	$P_{i=1} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=1''}$	$P_{i=2} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=1''}$	$P_{i=3} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=1''}$	$P_{i=4} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=1''}$
	$k=2$ 2–4		$(\bar{U} + \sigma)_{32}$	$P_{i=1} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=2''}$	$P_{i=2} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=2''}$	$P_{i=3} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=2''}$	$P_{i=4} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=2''}$
	$k=3$ 4–6		$(\bar{U} + \sigma)_{33}$	$P_{i=1} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=3''}$	$P_{i=2} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=3''}$	$P_{i=3} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=3''}$	$P_{i=4} \cdot P_{j=3} \cdot P_{k=3''}$
	etc.						
$j=19$ Calme du vent	$k=0$ 0	0	0	$P_{i=1} \cdot P_{j=19} \cdot P_{k=0}$	$P_{i=2} \cdot P_{j=19} \cdot P_{k=0}$	$P_{i=3} \cdot P_{j=19} \cdot P_{k=0}$	$P_{i=4} \cdot P_{j=19} \cdot P_{k=0}$
Période de confort relative par rapport à la durée totale de période d'utilisation prédéfinie (%):							

Tableau 38 : Tableau de calcul de fréquence du confort et de l'inconfort aérothermique pour les données du vent et de la température considérées comme variables aléatoires indépendantes

Chaque élément de caractère climatique du tableau peut être caractérisé par une fréquence d'occurrence pendant la période d'utilisation prédéfinie : la probabilité de concomitance d'un vent dans un intervalle de vitesse k , d'un secteur j couplé par une température d'intervalle k est présentée par le produit des probabilités d'occurrence de ces éléments : $P_i \cdot P_j \cdot P_k$. Ainsi, chaque cellule du tableau correspond à une fréquence de concomitance d'un vent de vitesse définie, d'un certain secteur et d'une certaine valeur de température.

Le Tableau 38 groupe les données climatiques et est basé sur l'hypothèse qu'il n'existe pas de corrélation entre la vitesse du vent et la température. En d'autres termes, il est supposé que le vent et la température sont des **variables aléatoires indépendantes**. En conséquence, la fréquence d'occurrence d'un certain intervalle de température (P_i) est identique pour toutes les combinaisons de l'incidence et de la vitesse du vent. Ainsi, la valeur qui caractérise la fréquence de l'occurrence d'un certain intervalle de température (P_i) reste identique dans chaque colonne correspondant à un intervalle de température.

En conséquence, la fréquence d'occurrence d'un certain intervalle de vitesse du vent d'un secteur ($P_k \cdot P_j$) est identique pour tous les intervalles des températures. Ainsi, la valeur qui caractérise la fréquence de l'occurrence d'un certain intervalle du vent d'un secteur ($P_k \cdot P_j$) reste identique dans chaque ligne correspondant à des vitesses d'un secteur défini du tableau.

L'étendue et le nombre des intervalles de température et des vitesses du vent (caractérisés par ses valeurs moyennes) illustrés dans le Tableau 38 n'ont qu'un caractère informatif, ils peuvent être modifiés en fonction de la précision de l'analyse.

Si les données du vent représentent des caractéristiques régulières dues aux phénomènes micro- ou mézoclimatiques (par exemple le vent marin) elles doivent être confrontées à la période d'utilisation du stade.

Il ne peut pas être exclu que la fréquence d'occurrence des températures et celles du vent sont corrélées, en d'autres termes, elles ne sont pas des variables aléatoires indépendantes. En conséquence, les valeurs du produit $P_i \cdot P_j \cdot P_k$ doivent être calculées en tenant compte cette corrélation.

Un tableau de caractère identique du Tableau 38 est à concevoir pour chaque valeur caractéristique de Ψ , notamment pour la valeur moyenne de Ψ , ($\bar{\Psi}$), par le premier décile ($\Psi_{10\%}$) et par le dernier décile ($\Psi_{90\%}$). Les valeurs de $\bar{\Psi}$ décrivent les conditions aérodynamiques moyennes dans l'intégralité des tribunes, tandis que les valeurs déciles de Ψ ($\Psi_{10\%}$ et $\Psi_{90\%}$) caractérisent celles des zones fortement ventilées, et des zones de calme du vent. Ces valeurs sont calculées à partir des résultats obtenus en soufflerie, éventuellement par l'interpolation pour les secteurs qui ne comportent pas les axes caractéristiques du stade.

Ces valeurs caractéristiques de Ψ varient par secteur, en d'autres termes en fonction de l'incidence du vent. Cependant, les valeurs de la somme de la vitesse moyenne et son écart type ($\bar{U} + \sigma$) qui

caractérisent **les conditions aérauliques prévalant au niveau des tribunes**, donc rencontrées par les spectateurs, **varient par secteur et aussi en fonction de la vitesse du vent**. L'aire des zones concernées par la valeur moyenne de Ψ est constante pour toutes les incidences et égale à l'aire totale des tribunes. Tandis que celles concernées par les valeurs de déciles de Ψ ($\Psi_{10\%}$ et $\Psi_{90\%}$) varient en fonction du secteur avec les valeurs caractéristiques de Ψ .

Ainsi chaque configuration possède trois tableaux appartenant aux 3 différentes sortes de valeurs caractéristiques de Ψ : au $\bar{\Psi}$, au $\Psi_{10\%}$ et au $\Psi_{90\%}$. Pour chaque intervalle de vitesse et pour chaque secteur du vent, la somme de la vitesse moyenne et son écart type ($\bar{U} + \sigma$) qui caractérisent les conditions aérauliques rencontrées par les spectateurs, sont calculées à partir des valeurs caractéristiques de Ψ .

Les cellules du tableau sont qualifiées "confortables" ou "inconfortables" sur la base de la zone de confort décrite dans le Chapitre II et illustrée par la Figure 132. Une cellule peut être qualifiée inconfortable, soit par **l'inconfort thermique** ou par **gêne mécanique**, soit du fait de la combinaison de ces deux phénomènes. Les cellules dont les paramètres climatiques correspondant à des conditions d'inconfort au niveau de tribunes sont groupées en cinq catégories :

- **Conditions inconfortables dues à l'effet mécanique du vent**, c'est-à-dire que la vitesse du vent dépasse le seuil de 3.6 m/s, en même temps il n'y a pas de l'inconfort thermique (Zone "A" sur Figure 133).
- Conditions **d'inconfort thermique** dues à la coïncidence des **températures basses** et des vitesses de vent élevées sans excès du seuil mécanique de 3.6 m/s (zone "B" sur Figure 133);
- Conditions **d'inconforts mécanique et thermique simultanées dues à la coïncidence de températures basses et de vitesses de vent élevées** qui dépassent le seuil mécanique de 3.6 m/s (zone "C" sur Figure 133);
- Conditions **d'inconfort thermique** dues à des **températures élevées** et au manque de ventilation (zone "D" sur Figure 133);
- Conditions **d'inconfort mécanique et thermique simultanée dues à la coïncidence de températures élevées jusqu'à d'environ 37 °C et de vitesses de vent importantes** qui dépassent le seuil mécanique de 3.6 m/s mais n'atteignent pas celle qui serait requise pour le maintien de l'équilibre thermique du corps humain (zone "E" sur Figure 133).

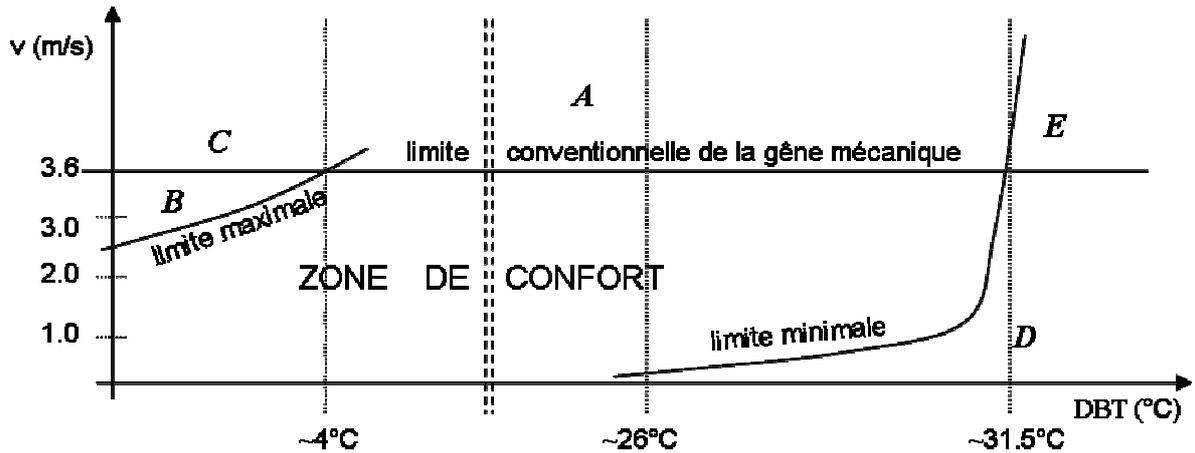


Figure 132 : Zone de confort aérothermique délimitée par les critères thermiques et mécaniques. La zone de confort est joutée par les différentes zones de l'inconfort marquées par A, B, C, D et E.

Dans en premier temps, uniquement l'effet de la température et la vitesse du vent sont prise en compte, sans concerner l'effet du rayonnement.

La somme des valeurs correspondant à chaque cellule du tableau qualifiées "confortables", obtenues à partir les valeurs de $\bar{\Psi}$, détermine la partie de la période d'utilisation pendant laquelle les conditions moyennes aérothermiques au niveau des tribunes sont confortables. La différence entre la période totale de l'utilisation du stade et la période du confort équivaut à la période de l'inconfort aérothermique divisée en cinq catégories (Figure 132).

La qualité aérothermique d'une configuration de stade est jugée favorable si la période de confort (par rapport à la période totale d'utilisation) est plus importante.

Les valeurs de $\Psi_{90\%}$, permettent de définir la période pendant laquelle les conditions aérothermiques sont confortables et inconfortables dans les zones fortement ventilées au niveau des tribunes, en d'autres termes dans les zones concernées par les valeurs de $\Psi_{90\%}$. Le calcul est procédé également à partir la zone de confort, en faisant attention au dépassement du seuil mécanique de 3.6 m/s et également au dépassement du seuil défini par la limite "maximale" de la zone de confort [Chapitre II.1.]. Ce dernier indique les vitesses du vent admissibles pour les différentes températures basses extérieures, de façon que la combinaison de ces deux phénomènes permet aux spectateurs de maintenir des conditions aérothermiques confortables.

Un processus identique est à répéter pour les valeurs de $\Psi_{10\%}$, afin de définir le confort aérothermique dans les zones de moindre ventilation, donc concernées par les valeurs de $\Psi_{10\%}$. Le confort aérothermique est également évalué à partir la zone de confort, mais concernant en particulier le seuil "minimal" de celle-ci [Chapitre II.1.]. Le seuil minimal permet de définir les vitesses requises pour le maintien du confort aérothermique dans le cas où les températures sont élevées.

Quant à la localisation des zones concernées par les valeurs de $\Psi_{10\%}$, et de $\Psi_{90\%}$, leur déplacement en fonction de l'incidence du vent peut montrer une tendance pour certaines configurations et peut permettre de déduire à une tendance [Chapitre II.3.].

La particularité de cette méthode réside dans l'analyse complexe des conditions aérothermiques, notamment en l'étude de correspondance de l'échelle complète des vitesses, des incidences du vent et des températures qui apparaissent sur le site d'implantation.

Cette méthode permet d'évaluer le confort aérothermique des spectateurs dans les configurations du stade présélectionnées pour un site d'implantation bien défini.

4.5 ETUDE DES CAS

La méthode de transposition des résultats obtenus au cours des essais paramétriques en soufflerie permet que ces résultats soient appliqués aux cas réels.

Huit configurations qui présentent des caractéristiques aérodynamiques différentes sont choisies comme exemple d'étude pour un site d'implantation défini :

- C1 – stade avec toiture horizontale;
- C2 – stade avec toiture descendante de 15° vers l'aire de jeu;
- C4 – stade avec façade fermée (façade sans brèches);
- C5 – stade avec toiture débordée;
- C6 – stade avec toiture d'ouverture centrale réduit;
- C8 – stade avec façade divisée par des brèches horizontales périphériques;
- C10 – stade avec façade divisée par des brèches horizontales périphériques couverte par une grille de 50% de porosité;
- C16 – stade avec façade divisée par des brèches verticales périphériques uniformément réparties.

La qualité aérothermique de ces configurations est calculée pour une localisation choisie, pour **Budapest en Hongrie**. Le climat de Budapest est continental ce qui signifie de grands écarts entre les températures caractéristiques en hiver et en été. C'est pourquoi la saison d'utilisation des stades dans cette zone géographique est définie du 1 Mars au 30 Novembre. Les données de vent de la station météorologique la plus proche de Budapest et celles de la température sont présentées par la Figure 133 et par le Tableau 39 pour la saison définie ci-dessus :

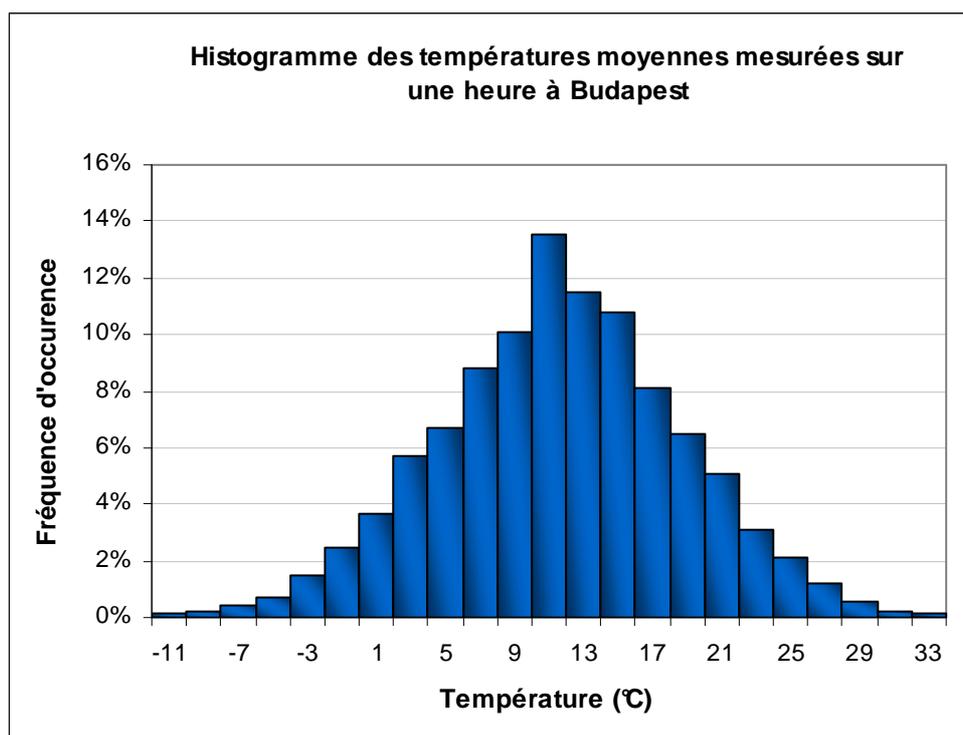


Figure 133 : Distribution de la température moyenne mesurée sur une heure à Budapest. Entre le 1^{er} Mars et le 30 Novembre

**Chaque barre de l'histogramme indique un intervalle de température de 2 degrés. Les valeurs sur l'abscisse correspondent à la limite inférieure de chaque intervalle.*

La distribution de la température correspond à la période d'utilisation : du 1 Mars au 30 Novembre.
 Les données du vent sont mesurées pendant dix ans : 1991 - 2001.

Az szinoptikus szélesebesség főirányok szerinti relatív gyakorisága													Fréquence d'occurrence du vent							
Budapest XVII.ker Lőrinc 1991-2001																				
szélesebesség [m/s]			szélirány - incidence du vent																Rel. gyakoriság	
vitesse du vent [m/s]			Nord	NNE	NE	ENE	Est	ESE	SE	SSE	Sud	SSO	SO	OSO	Ouest	ONO	NO	NNO		
min	max	moyen	változó (szélcsend)	É	ÉÉK	ÉK	KÉK	K	KDK	DK	DDK	D	DDNY	DNY	NYDNY	NY	NYÉNY	ÉNY	ÉÉNY	
min	max	közép	calme	90°	67.5°	45°	22.5°	360°	337.5°	315°	292.5°	270°	247.5°	225°	202.5°	180°	157.5°	135°	112.5°	Fréquence
0	0.1	0.05	0.8																	0.8
0.1	1.1	0.6	0	1.7	1.3	1.2	0.9	1.1	0.9	0.8	0.8	1.1	1.1	0.9	0.7	0.7	0.5	0.6	0.9	15.2
1.1	2.1	1.6	0.1	3.8	2.6	2.4	2.2	3	2.7	2.2	1.5	1.9	2	2	1.5	1.3	1	1.3	2.2	33.7
2.1	3.1	2.6	0	1.9	0.7	0.8	1.4	2.9	2.5	1.3	1	1.3	1.1	1.2	1	1.1	1	1.6	2.6	23.4
3.1	4.1	3.6	0	0.6	0.2	0.2	0.5	1.1	0.7	0.5	0.5	0.7	0.4	0.6	0.5	0.7	1.1	2	1.8	12.1
4.1	5.1	4.6	0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.2	0.3	0.2	0.5	0.9	2	1.2	7.3
5.1	6.1	5.6	0	0.1			0.1				0.1	0.1		0.1	0.1	0.2	0.7	1.5	0.6	3.6
6.1	7.1	6.6													0.1	0.4	1.1	0.3		1.9
7.1	9.1	8.1														0.3	0.7	0.2		1.2
9.1	11.1	10.1														0.1	0.1			0.2
11.1	15.1	13.1																		0
15.1	20.1	17.6																		0
Rel. gyakoriság																				99.4
Fréquence d'occurrence			0.9	8.3	4.9	4.7	5.3	8.4	6.9	5	4.2	5.6	4.8	5.1	4	4.6	6	10.9	9.8	99.4

Tableau 39 : Données du vent de Budapest, Hongrie

Tout d'abord le **calcul de la fréquence de confort et d'inconfort est effectué à partir des valeurs moyennes de Ψ , de $\bar{\Psi}$** pour les configuration sélectionnées afin de décrire **les conditions aérothermiques moyennes au niveau des tribunes**. Les Tableaux 40 – 63 illustrent les résultats des calculs.

L'axe longitudinal de chaque configuration est orienté nord-sud.

BUDAPEST	
C1 psi moyen	
Inconfort thermique dû à une température basse sans inconfort mécanique (%) :	0.62%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.03%
Inconfort mécanique (%) :	0.18%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.74%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.43%

BUDAPEST	
C2 psi moyen	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	1.04%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.12%
Inconfort mécanique (%) :	0.40%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.74%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	96.70%

BUDAPEST	
C4 psi moyen	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.81%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.04%
Inconfort mécanique (%) :	0.16%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.74%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.24%

Tableau 40, Tableau 41, Tableau 42 : Fréquence de confort et d'inconfort par rapport à la durée totale de la saison pour les C1, C2, et C4.

BUDAPEST	
C5 psi moyen	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	1.32%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.31%
Inconfort mécanique (%) :	1.14%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.59%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	95.65%

BUDAPEST	
C6 psi moyen	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.70%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.04%
Inconfort mécanique (%) :	0.17%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.81%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.28%

BUDAPEST	
C8 psi moyen	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	1.65%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	1.33%
Inconfort mécanique (%) :	5.38%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.43%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	90.21%

BUDAPEST	
C10 psi moyen	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.82%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.04%
Inconfort mécanique (%) :	0.16%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.74%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.24%

Tableau 43, Tableau 44, Tableau 45, Tableau 46 : Fréquence de confort et d'inconfort par rapport à la durée totale de la saison pour les C5, C6, C8 et C10.

BUDAPEST	
C16 psi moyen	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.63%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.04%
Inconfort mécanique (%) :	0.17%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.74%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.42%

Tableau 47 : Fréquence de confort et d'inconfort par rapport à la durée totale de la saison pour la C16.

Une première analyse des résultats peut suggérer à première vue qu'il n'existe pas de différence prononcée entre les configurations étudiées. Ces résultats doivent être qualifiés en concernant les éléments suivants :

- **La localisation géographique présente des caractéristiques favorables du point de vue du confort au vent** car le site est relativement peu venté : la fréquence des vents dont la vitesse moyenne dépasse de 6 m/s est environ 1% (dans l'année).
- **Les spectateurs sont en station assise immobile et prolongée, ce qui correspond à une exigence de fréquence saisonnière d'inconfort inférieure à 5%.**

Ainsi même une différence de 2% dans la durée de la période d'inconfort peut être très marquant. En conséquence, la configuration 5 (C5) avec une fréquence de confort de 95.6% peut être encore tolérable à Budapest, néanmoins la configuration 8 (C8) avec une fréquence d'occurrence 90.2% est inacceptable sur la base de la valeur moyenne de Ψ .

En comparant ces deux configurations, **la configuration 5 (C5) présente des caractéristiques du point de vue du confort aérothermique environ deux fois plus favorables que la configuration 8 (C8)** pour le site choisi, car la fréquence de l'inconfort qui correspond à la C5 équivaut environ à la moitié de celle appartenant à la C8.

Les autres configurations étudiées impliquent une fréquence de confort pendant environ 96 à 97.5% de la durée totale de la saison.

La poursuite de l'analyse est basée sur les calculs menés à partir des valeurs déciles de Ψ : de $\Psi_{10\%}$ et de $\Psi_{90\%}$. Les Tableaux 48 - 55 illustrent les résultats des calculs obtenus à partir des valeurs de $\Psi_{10\%}$:

BUDAPEST	
C1 psi 10%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.30%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.00%
Inconfort mécanique (%) :	0.00%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	2.67%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.03%

BUDAPEST	
C2 psi 10%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.43%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.00%
Inconfort mécanique (%) :	0.00%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	2.20%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.37%

BUDAPEST	
C4 psi 10%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.27%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.00%
Inconfort mécanique (%) :	0.00%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	2.67%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.06%

BUDAPEST	
C5 psi 10%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.40%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.00%
Inconfort mécanique (%) :	0.00%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	2.29%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.31%

Tableau 48, Tableau 49, Tableau 50, Tableau 51 : Fréquence de confort et d'inconfort par rapport à la durée totale de la saison pour les C1, C2, C4 et C5.

BUDAPEST	
C6 psi 10%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.28%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.00%
Inconfort mécanique (%) :	0.00%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	2.67%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.05%

BUDAPEST	
C8 psi 10%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.80%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.04%
Inconfort mécanique (%) :	0.16%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.74%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.25%

BUDAPEST	
C10 psi 10%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.37%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.00%
Inconfort mécanique (%) :	0.00%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	2.43%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.20%

BUDAPEST	
C16 psi 10%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.33%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.00%
Inconfort mécanique (%) :	0.00%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	2.67%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.00%

Tableau 52, Tableau 53, Tableau 54, Tableau 55: Durée de confort et d'inconfort par rapport à la durée totale de la saison pour les C6, C8, C10 et C16.

Toutes les configurations étudiées sont confortables du point de vue de $\Psi_{10\%}$ pendant environ 97% du temps. Cette valeur représente la fréquence du confort aérothermique uniquement dans les zones les moins ventilées, en d'autres termes pour celles qui sont concernées par les valeurs de $\Psi_{10\%}$.

Les configurations des façades fermées ou couvertes par des grilles, qui présentent une capacité protectrice plus élevée que la configuration 8 (C8) dont la façade est divisée par quatre brèches périphériques horizontales, **présentent des fréquences plus importantes d'inconfort dues aux températures élevées (pendant la période estivale)**. Ces valeurs qui se situent autour de 3% ne semblent pas importantes, néanmoins elles signifient 90-120 heures de la période totale. **Ceci suggère que les critères de confort "d'été" et ceux de protection contre le vent dans un climat continental peuvent s'opposer.**

L'emploi d'éléments amovibles par lesquels les caractéristiques aérodynamiques du stade paraissent être modifiés, pourraient répondre à ces exigences contradictoires : un écran brise-vent fermé pendant les périodes froides et ventées et ouvert pendant la période estivale.

Les conditions aérothermiques dans les zones les plus fortement ventilées sont caractérisées par les résultats d'analyse menée à partir des valeurs de neuvième décile de Ψ , de $\Psi_{90\%}$.

Le site choisi ne présente pas de conditions sévères dues au vent, cependant la fréquence des températures basses n'est pas négligeable pendant la période d'utilisation du stade. En conséquence, la durée de l'inconfort dû aux températures basses et/ou à la gêne mécanique peut être considérable dans ces zones des gradins.

Les Tableaux 56 - 63 illustrent les résultats des calculs obtenus à partir des valeurs de $\Psi_{90\%}$:

BUDAPEST	
C1 psi 90%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	1.37%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.60%
Inconfort mécanique (%) :	2.40%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.54%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	94.10%
BUDAPEST	
C2 psi 90%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	1.85%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	1.61%
Inconfort mécanique (%) :	5.52%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.33%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	89.69%

Tableau 56, Tableau 57 : Fréquence de confort et d'inconfort par rapport à la durée totale de la saison pour les C1 et C2.

BUDAPEST	
C4 psi 90%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	0.92%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.04%
Inconfort mécanique (%) :	0.16%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.74%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	97.13%

BUDAPEST	
C5 psi 90%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	2.16%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	3.60%
Inconfort mécanique (%) :	11.07%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.30%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	81.87%

BUDAPEST	
C6 psi 90%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	1.91%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	1.28%
Inconfort mécanique (%) :	4.51%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.43%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	90.87%

BUDAPEST	
C8 psi 90%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	3.07%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	3.97%
Inconfort mécanique (%) :	10.71%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.29%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	80.96%

Tableau 58, Tableau 59, Tableau 60, Tableau 61 : Fréquence de confort et d'inconfort par rapport à la durée totale de la saison pour les C4, C5, C6 et C8.

BUDAPEST	
C10 psi 90%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	1.69%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.97%
Inconfort mécanique (%) :	3.16%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.48%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	92.69%

BUDAPEST	
C16 psi 90%	
Inconfort thermique dû à une température basse. sans inconfort mécanique (%) :	1.23%
Inconfort simultané dû à l'effet mécanique de vent et à une température basse (%) :	0.73%
Inconfort mécanique (%) :	3.10%
Inconfort thermique dû à une température élevée. sans inconfort mécanique (%) :	1.58%
Fréquence du confort aérothermique (%) :	93.37%

Tableau 62 **Tableau 63: Fréquence de confort et d'inconfort par rapport à la durée totale de la saison pour les C10 et C16.**

En ce qui concerne les zones fortement ventilées, la C4 présente les caractéristiques les plus favorables du point de vue de confort aérothermique : la fréquence du confort dans ces zones est d'environ 97% au niveau des tribunes. Ainsi cette configuration est la plus "protectrice" parmi des configurations sélectionnées.

En comparant les résultats à ceux de la C4, les configurations 1 (C1), 2 (C2), 6 (C6), 10 (C10) et 16 (C16) donnent des fréquences de confort acceptables pour ce climat. En revanche, les résultats correspondant aux configurations 5 (C5) et 8 (C8) sont considérés comme critiques avec une fréquence d'inconfort d'environ 20%. Ceci dépasse la fréquence d'inconfort du site sans le stade!

Les résultats mettent en évidence qu'un climat continental où la variation des caractéristiques climatiques entre les saisons est très prononcée rend le choix d'une configuration pour un site défini difficile. En climats chauds ou froids, où les caractéristiques climatiques ne varient pas significativement au cours de l'année, les exigences vis-à-vis de l'ambiance aérothermique dans le stade, peuvent être respectés pendant une grande partie de la période de d'utilisation.

Cependant, dans un climat continental les critères varient avec la variation des conditions climatiques. Ceci conduit à la déduction qu'**une certaine flexibilité du bâtiment est souhaitable afin d'améliorer les conditions du confort**, en particulier celles de confort aérothermique des spectateurs. Le Tableau 64 illustre un exemple de la combinaison d'une configuration de capacité protectrice élevée (C4) et d'une autre dont les gradins sont très ventilés par un écoulement homogène (C10). La C4 comporte une façade sans ouvertures, tandis que la C10 comporte une façade divisée par quatre brèches horizontales uniformément réparties. Une

configuration "flexible", la combinaison de ces deux configurations où les brèches pourraient être soit, ouvertes, soit couvertes par des écrans opaques, pourrait répondre associé à une contrôle pertinente aux exigences du confort posées en climat tempéré.

La capacité protectrice de la C4 est nécessaire pour le maintien du confort aérothermique pendant les périodes où la température est basse et est couplé par les vents de vitesse supérieure au seuil mécanique. Cependant, une ventilation homogène et intensive, caractéristique à la C8, est souhaitée du point de vue de confort aérothermique, lorsque la température est élevée. Ces critères s'opposent. Une configuration "flexible" qui permet à la fois une ventilation homogène et forte des gradins et possède à la fois une capacité protectrice importante pourrait répondre à ces exigences opposées. Ainsi pour chaque variante de Ψ la fréquence de confort devient très favorable : elle est supérieure à 97%.

FRÉQUENCE (%)	C4 BUDAPEST	C8 BUDAPEST	C flexible-BUDAPEST
	C4 psi moyen	C8 psi moyen	C flexible
IT dû à une T basse. sans IM:	0.81%	1.65%	0.81%
IS dû à l'effet mécanique de vent et à une T basse:	0.04%	1.33%	0.04%
IM :	0.16%	5.38%	0.16%
IT dû à une T élevée. sans IM:	1.74%	1.43%	1.43%
Fréquence du confort aérothermique:	97.24%	90.21%	97.55%
	C4 psi 10%	C8 psi 10%	C flexible psi 10%
IT dû à une T basse. sans IM:	0.27%	0.80%	0.27%
IS dû à l'effet mécanique de vent et à une T basse:	0.00%	0.04%	0.00%
IM :	0.00%	0.16%	0.00%
IT dû à une T élevée. sans IM:	2.67%	1.74%	1.74%
Fréquence du confort aérothermique:	97.06%	97.25%	97.99%
	C4 psi 90%	C8 psi 90%	C flexible psi 90%
IT dû à une T basse. sans IM:	0.92%	3.07%	0.92%
IS dû à l'effet mécanique de vent et à une T basse:	0.04%	3.97%	0.04%
IM :	0.16%	10.71%	0.16%
IT dû à une T élevée. sans IM:	1.74%	1.29%	1.29%
Fréquence du confort aérothermique:	97.13%	80.96%	97.58%

Tableau 64 : Fréquence du confort pour un stade conçu par la combinaison de deux configurations : C4 et C8.
 "IT" signifie l'inconfort thermique, "T" signifie la température, "IM" signifie l'inconfort mécanique et "IS" l'inconfort simultané.

Ce métissage est donc le résultat d'une analyse préalable qui présente **une tentative d'optimiser la qualité de l'ambiance climatique par les moyens de l'architecture.**

Le rayonnement solaire influence le confort thermique et également le confort visuel des spectateurs. L'effet du rayonnement solaire sur le confort thermique et visuel des spectateurs dépende de plusieurs facteurs :

- les caractéristiques climatiques du site d'implantation;
- la configuration architecturale du stade (y compris l'orientation, la structure, les matériaux);
- l'emplacement de spectateurs par rapport à la toiture.

La problématique du confort visuel en lumière du jour se réduit par la proportion de l'ombre et du contraste au niveau de l'aire de jeu.

Une méthode a été établie afin de définir la partie opaque, transparente et translucide de la toiture à l'aide de l'horizontoscope afin de permettre un ensoleillement uniforme de l'aire de jeu, en fonction de la nature de

l'utilisation du stade et du lieu (de la position géographique). De cette manière, les spectateurs profitent de conditions confortables en terme d'ambiance visuelle pendant une période la plus longue possible.

Les limites de zone de confort sont modifiées par la présence du rayonnement solaire [Chapitre II.1.] : il compense les températures basses, tandis que la combinaison du rayonnement solaire et des températures élevées requiert un mouvement d'air afin de rétablir le confort thermique.

Sur le site choisi la fréquence des événements est plus importante pendant la période estivale, quand les températures sont relativement élevées. En conséquence, les spectateurs devraient être protégés du rayonnement solaire direct. Ceci suggère l'emploi d'une toiture opaque. Néanmoins avec une toiture opaque les exigences du confort visuelle peuvent être respectées uniquement pendant environ 40% de l'année, et encore moins pendant la période d'utilisation dans la localisation choisie, définie ci-dessus.

Les Figures 134 et 135 illustrent l'ensoleillement de l'aire de jeu pour la configuration qui présente la capacité protectrice la plus accentuée du point de vue aérodynamique : configuration 4 (C4) avec deux différentes orientation du stade. Les caractéristiques de l'ensoleillement de l'aire de jeu sont cependant très ressemblantes pour chaque configuration étudiée, à l'exception de la configuration 6 (C6), où l'oculus réduit conduit à la diminution de la durée de la période ensoleillée.

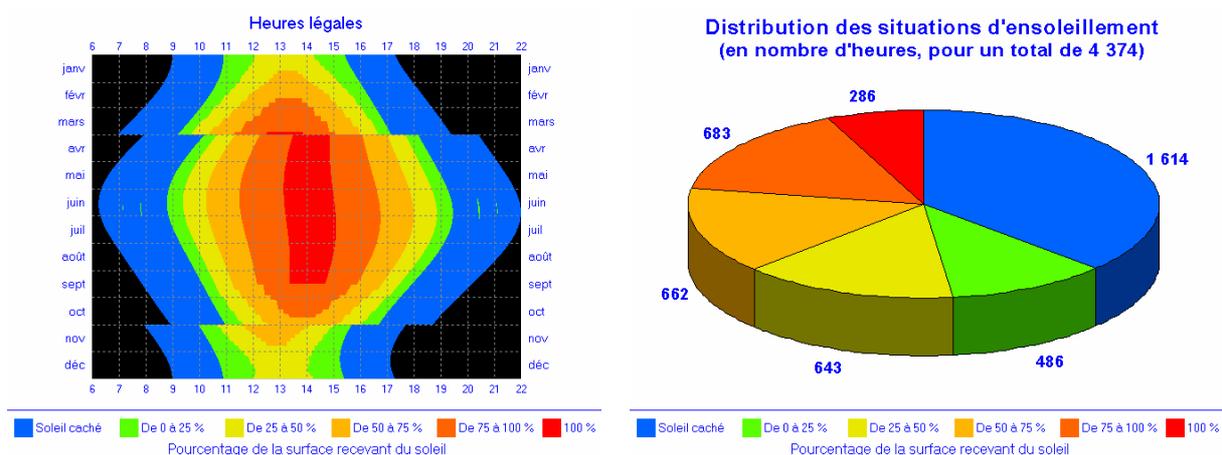


Figure 134 : Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 4 (C4) avec l'axe longitudinal orienté nord – sud, pour la latitude 47°12' nord.

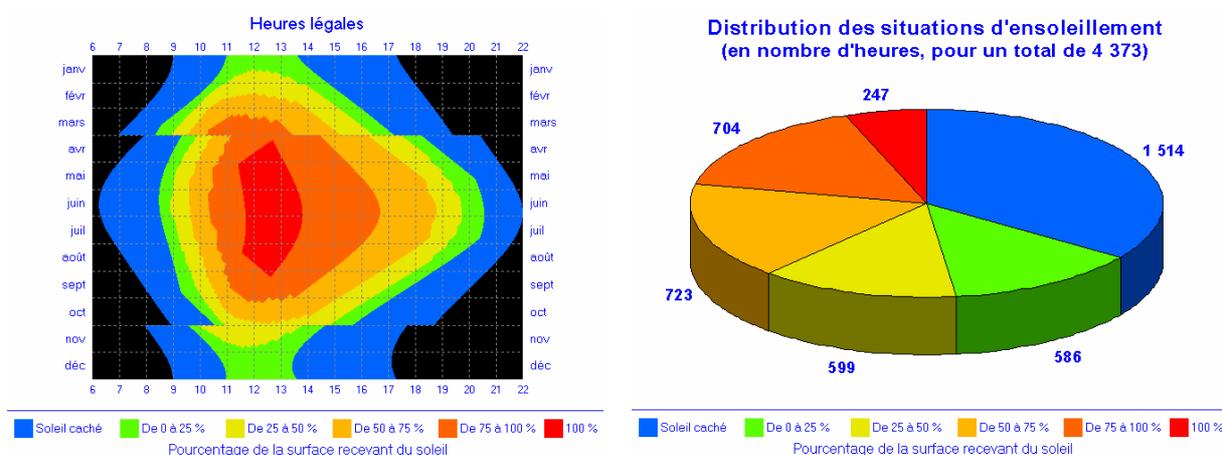


Figure 135 : Ensoleillement de l'aire de jeu de la configuration 4 (C4) avec l'axe longitudinal orienté nord – 45°– ouest, pour la latitude 47°12' nord.

Afin d'augmenter la durée de la période pendant laquelle l'aire de jeu est uniformément éclairée il est recommandé que certaines parties de la toiture soient constituées de matériaux de caractère photométrique transparent ou translucide. Ces deux sortes de matériaux transmettent la majorité du rayonnement visible : une toiture transparente fait apparaître néanmoins l'ombre portée de la structure, tandis qu'une toiture translucide réduit le contraste en diffusant la lumière dans toutes les directions.

5. REFLEXIONS SUR LA MÉTHODE DE CONFRONTATION DES CRITERES

La présente étude s'est intéressée à la caractérisation physique de différentes configurations de stades sous l'angle de trois paramètres distincts : l'**aérodynamique interne**, l'ambiance **lumineuse** et l'ambiance **acoustique**.

Les trois thématiques ont été abordées à des degrés d'approfondissement très hétérogènes en raison d'un intérêt plus particulièrement soutenu pour une discipline dominante. L'attention portée aux deux autres thèmes relève de l'objectif d'application de la recherche.

La trame conductrice de ce travail est l'exploration de l'aérodynamique d'un espace semi extérieur complexe de grande dimension. L'analyse paramétrique qui est menée à partir des nombreuses configurations testées expérimentalement en soufflerie démontre cette volonté de constitution d'une connaissance "appropriable" et transposable. Il s'agit bien par ce travail de "décortiquer" le stade en composants ou caractères élémentaires identifiables (proportion, toiture, façade) et de les décliner en autant de versions que la réalité des stades contemporains nous en propose. L'impact sur l'aérodynamique interne de la variation de ces composants est alors analysé.

La perception (subjective) d'un espace, présente pour l'individu un caractère globalisant. Il est en effet délicat dans le contexte global de "l'ambiance", lorsqu'elle celle-ci est analysée via le filtre sensoriel, de déconnecter totalement les unes des autres les différentes composantes de cette ambiance.

C'est la raison pour laquelle, dans un objectif d'application pratique nous nous sommes attachés, sinon à analyser finement toutes les composantes d'ambiance, tout au moins à compléter notre approche aérodynamique par un regard sur les aspects visuels et sonores qui contribuent très largement à la constitution de "l'atmosphère". Cette notion d'atmosphère est primordiale dans le succès de fréquentation d'un tel espace public.

La méthode d'analyse multicritère repose sur une mise en parallèle des différents critères en montrant les tendances qualitatives induites dans chacun des domaines (aérodynamique, acoustique, éclairage) par la modification paramétrique du stade. Le regard porté aux thématiques sonore et visuelle permet d'enrichir le diagnostic aérodynamique par des notions de compatibilité ou d'incompatibilité. En d'autres termes, la modification de géométrie du stade à des fins d'amélioration aérodynamique, n'entraîne-t-elle pas de dégradation de la qualité visuelle ou n'induit-elle pas de phénomène acoustique non approprié à la fonction ?

Les résultats de cette démarche de confrontation sont purement qualitatifs et peuvent parfaitement s'inscrire dans les toutes premières étapes de la conception d'un projet de stade.

APERÇU DES CONFRONTATION DES CRITERES						
Paramètres		Ambiance aérothermique	Ambiance lumineuse	Aspects acoustiques	Aspects du choix	Commentaires
Matériau de TOITURE	transparente	Les spectateurs sont exposés au rayonnement solaire quasi direct.	L'ombre portée de la toiture disparaît, néanmoins celle de la structure est très prononcée.	Les caractéristiques acoustiques sont les fonctions de l'absorption de la surface inférieure de la toiture.	Il est favorable en climat froid car il transmet du rayonnement solaire.	Le contraste est atténué, mais l'ombre de la structure peut être gênant.
	translucide	L'intensité du rayonnement solaire directe est atténuée.	L'ombre portée de la structure sur l'aire de jeu n'est pas accentuée dû au caractère diffusant de matériau.		Il est favorable en climat froid car il transmet et diffuse du rayonnement solaire.	Le contraste est évité par la diffusion de lumière dans tous les sens.
	opaque	La charge thermique des spectateurs est réduite par rapport à une toiture transparente.	Problèmes sévères de contraste dû à l'ombre de la toiture projetée sur l'aire de jeu ensoleillée.		Il est préférable en climat chaud car il ne transmet pas du rayonnement solaire direct.	Le contraste peut être évité par la combinaison des zones opaques et transparentes.
Inclinaison de la TOITURE	-15° (descendant vers l'aire de jeu)	L'intensité de l'écoulement au niveau des tribunes est augmentée par l'inclinaison de la toiture. Une toiture horizontale induit une ventilation moins forte. Pour des toitures montantes (+15°, +30°) la ventilation est très forte pour l'incidence diagonale, cependant une toiture et horizontale est moins sensible à l'incidence.	L'inclinaison de la toiture dans le sens de l'aire de jeu et également dans le sens du contour extérieur du stade augmente la durée de la période pendant laquelle l'éclairage de l'aire de jeu en lumière du jour est uniforme pour l'orientations étudiées (Chapitre III, Figures III. 3.24 et III. 3.25.).	Pour une toiture descendante le phénomène de réverbération est supposé plus accentué que pour une toiture montante.	En climat froid une toiture horizontale est favorable. Au contraire, en climat chaud des toitures inclinées peuvent être avantageuses car elles contribuent à l'intensification de l'écoulement au niveau des tribunes.	En climat chaud la toiture opaque (en terme de qualité photométrique) est privilégiée. Concernant les conditions lumineuses, la combinaison des zones de différentes caractéristiques photométriques peut augmenter le niveau du confort visuel.
	0° (horizontale)					
	+15° (montant vers l'aire de jeu)					
	+30° (montant vers l'aire de jeu)					

Paramètres		Ambiance aérothermique	Ambiance lumineuse	Aspects acoustiques	Aspects du choix	Commentaires
Débord de la TOITURE	Vers l'extérieur	Un débord vers l'extérieur augmente l'intensité de la ventilation au niveau de l'intégralité des tribunes.	La durée de la période d'éclairage uniforme de l'aire de jeu est augmentée.	Il n'existe pas d'effet considérable.	Le débord permet d'ombrer la façade.	La périphérie du stade est protégée du rayonnement et des précipitations.
	Vers l'intérieur - oculus réduit	Un oculus réduit intensifie également la ventilation, en particulier aux parties hautes des tribunes au vent et sous le vent!	La durée de la période d'éclairage uniforme de l'aire de jeu est réduite.	La réverbération est supposée augmenter.	Cette configuration est conseillée pour les climats chauds et tempérés.	L'oculus réduit protège plus contre la pluie battante et du rayonnement.
Porosité de la FACADE (exprimé en nombre des brèches et en pourcentage)	0 %	Une façade fermée (de porosité de 0%) possède une capacité protectrice maximale. L'augmentation du taux de la porosité conduit à la croissance de l'intensité de la ventilation. En conséquence, la durée des périodes d'inconfort due à la température haute diminue par la croissance du taux de la porosité.	L'augmentation du taux de la porosité de 0% à 10% fait diminuer la durée de l'éclairage uniforme de l'aire de jeu considérablement : pour une façade fermée l'aire de jeu est à l'ombre pendant une période longue. L'insertion des brèches en plus n'implique pas de changement significatif.	L'augmentation du taux de la porosité de la façade et la hauteur des brèches conduit à la décroissance du facteur de l'incidence du son et probablement la diminution du temps de réverbération.	Les configurations de nombre des brèches réduites ou de l'hauteur de brèches réduite sont conseillées pour les sites ventés ou pour les climats froids. En climats chaudes ces configurations peuvent être bien combinées avec une toiture opaque.	Les brèches horizontales permettent de couper les gradins en secteurs horizontaux et ainsi de concevoir la circulation d'une manière claire et sécurisée. Les tribunes chevauchées permettent que les spectateurs ne soient pas trop éloignés de l'aire de jeu.
	1 brèche horizontale – 10%					
	1 brèche horizontale – 20%					
	3 brèches horizontales – 30%					
	4 brèches horizontales – 40%					
	4 brèches horizontales + grille de 50% - 20%	Le taux de porosité de la façade réduite par des écrans brise vent conduit à la modération de l'intensité de ventilation des gradins par rapport aux configurations sans écrans. La porosité n'affecte pas significativement l'homogénéité de l'écoulement, cependant l'homogénéité semble à être sensible à l'incidence du vent.				
	4 brèches horizontales+ 2 grilles de 50% superposées – 25%	Le taux de la porosité de la façade réduite par des écrans				

<p>Porosité de la FACADE (exprimé en nombre des brèches et en pourcentage)</p>	<p>4 brèches horizontales+ 2 grilles de 50% éloignées – 25%</p>	<p>brise vent conduit à la modération de l'intensité de ventilation des gradins par rapport aux configurations sans écrans. La porosité n'affecte pas significativement l'homogénéité de l'écoulement, cependant l'homogénéité semble être sensible à l'incidence du vent.</p>	<p>La porosité constituée des brèches périphériques et des écrans brise-vent ne semble pas affecter d'une large mesure l'éclairage uniforme de l'aire de jeu</p>	<p>L'augmentation du taux de porosité de la façade et la hauteur des brèches conduit à la décroissance du facteur de l'incidence du soleil et probablement la diminution du temps de réverbération.</p>	<p>Les configurations comportant des brèches ouvertes ou couvertes par les écrans brise vents sont recommandées en climats chauds où le mouvement d'air contribue au maintien du confort aérothermique.</p>	
	<p>Brèches verticales uniformément réparties – 15%</p>	<p>L'insertion des brèches verticales au niveau de la partie haute des gradins n'entraîne pas d'augmentation considérable de la ventilation.</p>	<p>Les brèches verticales n'affectent pas significativement l'éclairage uniforme de l'aire de jeu en lumière du jour.</p>		<p>Le choix de ces configurations est motivé principalement par les aspects de sécurité et de fonction.</p>	<p>L'insertion des brèches verticales permet de séparer les supports des équipes adversaires.</p>
	<p>Brèches verticales aux angles – 5%</p>	<p>Les brèches verticales aux angles n'intensifient pas considérablement la ventilation, cependant elles entraînent l'apparition de zones localement très ventées à proximité des brèches.</p>				<p>Des zones localement très ventées peuvent être protégées par des écrans brise-vent qui permettent d'éviter l'apparition de jets à proximité des angles.</p>
	<p>Angles ouverts – 40%</p>	<p>L'ouverture des angles conduit à la croissance considérable du niveau de la ventilation. L'écoulement est relativement homogène et est marqué par la présence des zones localement très ventées.</p>	<p>Les angles ouverts sont supposés augmenter la durée de la période pendant laquelle l'aire de jeu est uniformément éclairée.</p>			

<p>Combinaison des configurations "déclinant" le porosité de la façade</p>	<p>Chaque configuration qui comporte des brèches périphériques peut être combinée à une configuration d'une façade complètement fermée pourvu que le stade comporte des éléments ajustables : écrans brise-vent amovibles solides ou souples.</p>	<p>Seules l'ouverture et la fermeture de la brèche périphérique qui se situe entre la toiture et les tribunes affectent considérablement les conditions lumineuses au niveau de l'aire de jeu.</p>	<p>Le temps de réverbération et le facteurs de l'incidence du son/l'orientation sonore diminuent avec l'ouverture des brèches et augmentent avec la fermeture des celles-ci.</p>	<p>Une configuration qui comporte des éléments amovibles serait privilégiée en climats tempérés où les conditions climatiques, en particulier la température et le vent, varient fortement par saison.</p>
--	---	--	--	--

Tableau 65 : Confrontation des critères

6. LE STADE IDÉAL EXISTE-T-IL?

Les résultats des essais paramétriques ont mis en évidence qu'il existe des relations entre la morphologie du stade et les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes. Les variations de l'indice Ψ ont permis de classer les configurations à partir de leur "qualité" aérodynamique uniquement sur la base des résultats des essais menés en soufflerie, donc indépendamment des caractéristiques climatiques du site d'implantation. Les configurations du stade, testées chacune pour trois incidences du vent, ont été classées selon l'intensité de la ventilation et l'homogénéité de l'écoulement au niveau des tribunes.

En ce qui concerne les critères aérauliques

- **une ventilation homogène est préférable au niveau des tribunes pour tous les types de climats**, ce qui conduit à des conditions aérauliques globalement identiques pour tous les spectateurs;
- **une capacité protectrice plus élevée est avantageuse en climats froids**, ceci permet une ventilation moins forte;
- **une ventilation plus forte au niveau des tribunes est préférable en climats chauds** afin d'augmenter les échanges par convection et évaporation entre les spectateurs et leur environnement;
- **le risque de dépassement du seuil mécanique doit être réduit dans tous les cas**, ce qui est déterminé d'une part par le caractère protecteur du stade et d'autre part par l'homogénéité de l'écoulement;
- **en climats tempérés la combinaison des critères listés ci-dessus serait avantageuse en raison des différences saisonnières significatives des caractéristiques des paramètres climatiques**. Ceci nécessite une certaine flexibilité de structure du stade, par exemple : jalousies placées dans les brèches, ce qui permet de contrôler la ventilation.

Au cours des essais paramétriques pour toutes les incidences de vent la fréquence d'occurrence a été supposée identique car les configurations ont été étudiées sans localisation définie. **Ainsi, à partir des trois valeurs de chaque indice appartenant à l'incidence diagonale, longitudinale et transversale on obtient un seul indice pondéré par la fréquence d'occurrence** [Chapitre II. 3.]

La Figure 136 illustre les valeurs de $\bar{\Psi}^*$, de $\Psi_{10\%}^*$ et $\Psi_{90\%}^*$ pour les configurations étudiées. Les indices appartenant à la configuration 17 (C17) qui représente le cas de "référence théorique" sont symbolisés par des barres blanches, et ceux de la configuration 12 (C12) qui ne comporte pas de toiture, par des barres jaunes.

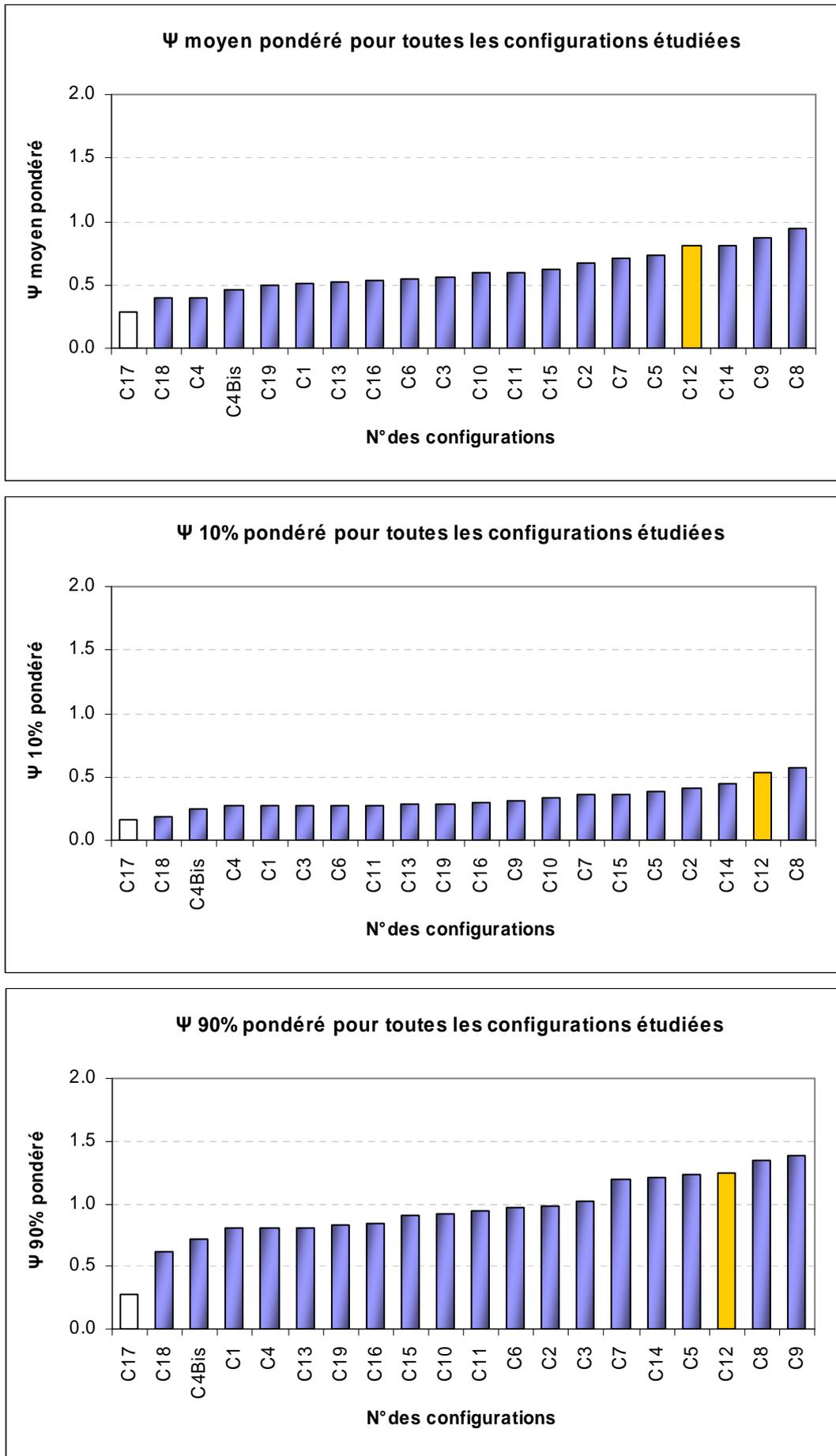


Figure 136 : Valeurs de $\bar{\Psi}^*$, de $\Psi_{10\%}^*$ et $\Psi_{90\%}^*$ pour chaque configuration étudiée

Les valeurs de $\overline{\Psi}^*$ sont représentatives des conditions moyennes aérauliques au niveau de l'intégralité des tribunes, tandis que les valeurs de $\Psi_{10\%}^*$ et $\Psi_{90\%}^*$ décrivent celles des zones de vent calme et des zones fortement ventilées. La capacité protectrice des configurations est déterminée à partir de ces trois valeurs.

La Figure 136 indique que le cas "référence théorique" (C17) induit globalement la ventilation la moins forte parmi les configurations étudiées. Cette configuration ne comporte pas de tribunes, mais uniquement deux grilles métalliques de porosité à 50% éloignées l'une de l'autre de 18 mètres en vraie grandeur. La présence des écrans poreux empêche le développement des zones fortement dépressionnaires dans le stade et amoindrit la création de phénomènes de recirculation du flux. En raison de l'absence des tribunes les valeurs caractéristiques de Ψ de la C17 (cas idéal théorique) n'ont pas de signification pratique. Cependant, elles mettent en évidence que **la présence des tribunes (masse bâtie) fait augmenter localement l'intensité de ventilation au niveau des places assises**. Les résultats de cette configuration représentent donc l'objectif d'optimum auquel il faudrait tendre. On ne peut évidemment l'atteindre totalement.

Outre "la référence théorique" **les configurations suivantes présentent une capacité protectrice élevée :**

- les tribunes divisées par des brèches horizontales périphériques régulièrement réparties et une façade couverte par deux grilles métalliques de porosité à 50% (C18). Ces dernières sont superposées mais éloignées de 18 mètres l'une de l'autre. Ce dispositif représente ainsi une porosité globale d'environ 10%. Néanmoins, les résultats de cette configuration illustrent qu'une façade couverte par deux grilles métalliques de porosité à 50% conduit à un niveau de ventilation légèrement plus élevé que celui de la configuration de "référence théorique". En même temps ces résultats sont inférieurs à ceux de la configuration 19 (C19) où les grilles métalliques de porosité à 50% qui couvrent une façade identique à celle de la C18 sont directement superposées l'une sur l'autre. **Ceci signifie que deux écrans brise-vent éloignés ont une capacité protectrice plus importante que deux écrans directement superposés de porosité identique**. La réalisation d'un stade comportant en façade deux écrans brise-vent éloignés est sans doute plus onéreuse que lorsque les écrans sont superposés. Cependant, le premier peut suggérer une architecture novatrice qui intègre entre des écrans des espaces spécifiques comme des zones sécuritaires, des zones de circulation ou des zones qui assurent la gestion de la foule.
- Les configurations 1 (C1), 4 (C4) et 4Bis (C4Bis) possèdent des valeurs relativement proches de celles du cas de "référence théorique". Ceci signifie que les configurations comportant **une façade complètement fermée ou divisée par des brèches horizontales concentrées en conservant un taux de porosité réduit présentent la capacité protectrice la plus importante parmi les configurations étudiées**.

Les modifications suivantes de certains paramètres font légèrement diminuer la capacité protectrice du stade par rapport aux configurations 1, 4 et 4Bis :

- **Inclinaison de la toiture montante vers l'aire de jeu (C3, C11);**
- **Augmentation du taux de porosité de la façade au-delà de 10% et en deçà de 20% :** division par des brèches et couverture par une seule grille (qui serve comme écran brise-vent) ou deux grilles superposées, ou division de la partie supérieure de la façade par des brèches verticales régulièrement réparties (C10, C19, C16);
- **Réduction de l'ouverture centrale (oculus) de la toiture (C6).**

Cependant, les modifications suivantes de certains paramètres induisent **une augmentation prononcée de l'intensité de l'écoulement** par rapport aux configurations les plus protectrices (C1, C4, C4Bis) et par rapport aux configurations de capacité protectrice légèrement diminuée (C3, C6, C10, C11, C16, C19) :

- **Augmentation du taux de la porosité de la façade au-delà de 20% :** division de la façade par des brèches horizontales régulièrement réparties (C8, C9), ou suppression des angles du stade (C14), ou augmentation de hauteur de la brèche horizontale concentrée entre la toiture et les gradins (C7);
- **Débord de la toiture vers l'extérieur (C5).**

L'homogénéité de l'écoulement est décrite par les indices IH 10% et IH 90% [Chapitre II.3.].

A partir de ces indices on obtient également des indices d'homogénéité pondérés, en supposant que la distribution de la fréquence par l'incidence du vent est identique pour chaque direction pour lesquelles la maquette a été étudiée en soufflerie [Chapitre II.3.] :

Plus les valeurs de IH 10%* et de IH 90%* sont proches de 1, plus l'écoulement est homogène. La Figure 137 illustre les indices IH 10%* et IH 90%*.

Ces indices montrent, que **les configurations comportant**

- **des brèches horizontales périphériques régulièrement réparties (C8),**
- **une façade complètement fermée (C4)**
- **une façade fermée et une toiture descendant vers l'aire de jeu (C2)**

induisent l'écoulement le plus homogène au niveau des tribunes.

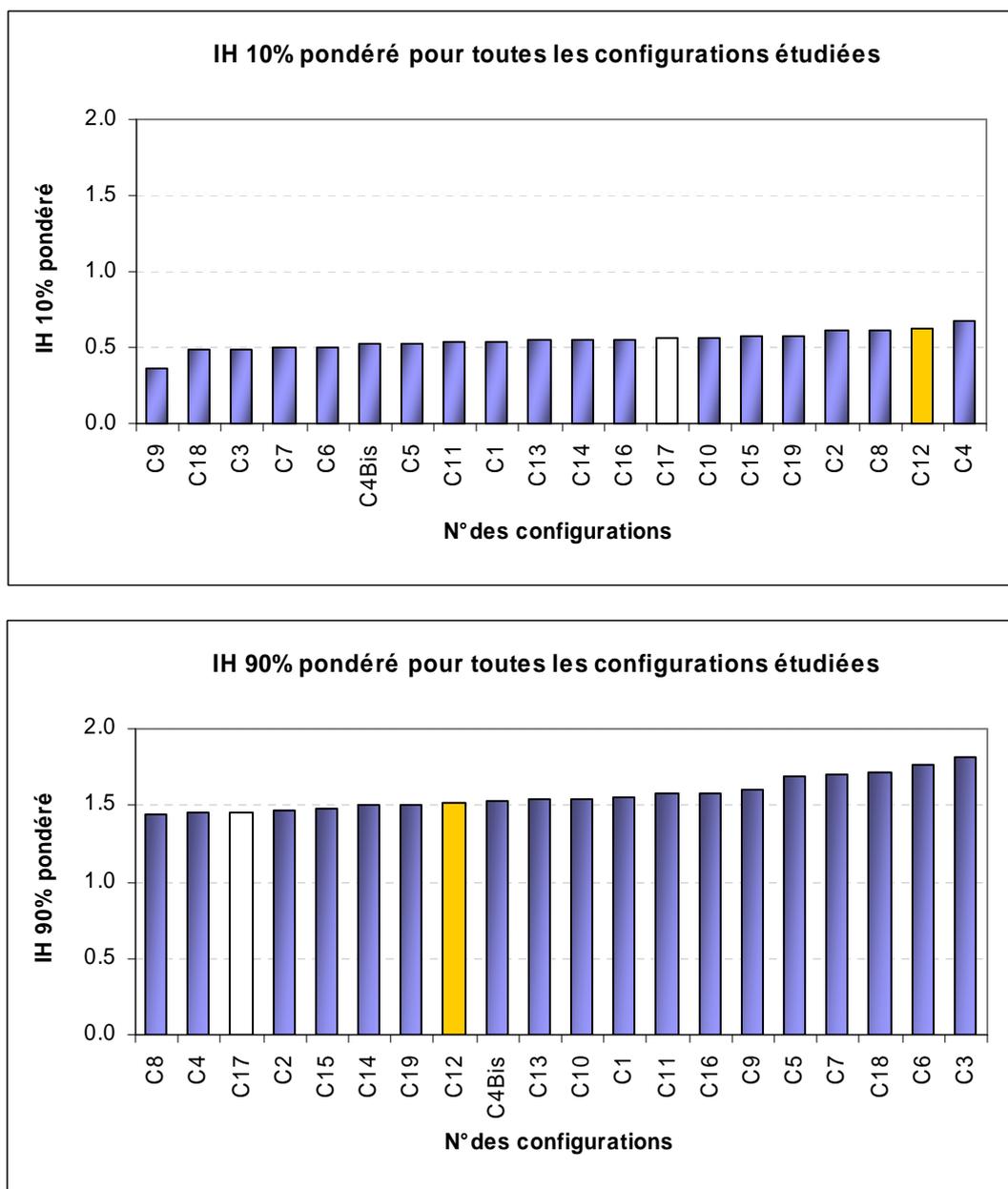


Figure 137 : Valeurs de IH 10%* et de IH 90%* pour chaque configuration étudiée

Non seulement l'écoulement au niveau des tribunes induit par la C4 dont la façade est fermée est homogène, mais encore sa capacité protectrice est importante. Cette configuration semble un bon choix architectural pour les climats froids.

En revanche, la C8 qui comporte des brèches horizontales périphériques régulièrement réparties induit un écoulement homogène et intense. Cette solution serait favorable aux climats chauds à moins que la fréquence de dépassement du seuil mécanique de 3.6 m/s soit importante.

La C2 avec une toiture descendante vers l'aire de jeu et une façade fermée semblablement à la C8 génère une ventilation intense et homogène. Elle pourrait également être une solution avantageuse pour les climats chauds.

Les résultats des essais menés en soufflerie acquièrent un sens concret lorsqu'ils sont transposés aux cas réels. A travers cette transposition l'écoulement au niveau des tribunes peut être caractérisé par des valeurs de vitesse absolue dans les zones choisies (zones fortement ventilées, zones de moindre ventilation etc.). Ces valeurs de vitesse couplées à des températures extérieures et associées à la zone de confort permettent de qualifier le stade du point de vue de confort aérothermique des spectateurs. **La fréquence du confort aérothermique** (exprimée en pourcentage du temps) **dépend des caractéristiques climatiques du site d'implantation. C'est-à-dire que la notion de "stade idéal" du point de vue du confort aérothermique des spectateurs est fortement dépendante des conditions climatiques du site.**

CONCLUSION

Etant à la fois ouverts et couverts, **les stades représentent une transition entre les espaces intérieurs et extérieurs**. Ils sont classés en **espaces semi extérieurs** car les usagers de ces espaces restent exposés aux conditions climatiques. Néanmoins, l'effet de certains paramètres climatiques, en particulier celui du **vent** et du **rayonnement solaire** peut éventuellement être modifié par différents éléments structurels du stade, par exemple par un mur qui protège du vent, ou par une toiture qui protège du soleil ou des précipitations. Toutefois, les effets des paramètres climatiques peuvent rarement être totalement éliminés par ces structures.

Les caractéristiques climatiques ne sont pas toujours prises en compte dans la conception des stades. Or ces caractéristiques climatiques sont des facteurs déterminants de la qualité des ambiances de ces espaces. Il est donc nécessaire de les intégrer dès la phase de conception afin d'assurer le confort aérothermique des spectateurs.

C'est pourquoi l'objectif de la présente étude a consisté à développer une approche méthodologie d'évaluation du confort, et en particulier du confort aérothermique des spectateurs dans les stades modernes. L'approche expérimentale aérodynamique a été complétée par la mise en oeuvre d'une méthodologie qui permet d'évaluer le confort visuel des spectateurs.

Dans en premier temps, la démarche a consisté à appréhender la notion du confort dans les espaces semi-extérieurs : une zone de confort aérothermique a été conçue sur la base des indices et des critères existants de confort thermique et mécanique. **La "zone de confort" permet d'évaluer le confort aérothermique en tenant compte de l'effet conjugué du vent et de la température.** En dehors de la zone de confort se situent les différentes conditions climatiques qui induisent un inconfort aérothermique. Selon la "nature" de la gêne, plusieurs sortes d'inconfort ont été différenciées :

- Inconfort dû uniquement à l'effet mécanique du vent;
- Inconfort dû à l'effet mécanique du vent et à une température basse sans dépasser le seuil mécanique de 3.6 m/s;
- Inconfort simultané dû à l'effet mécanique du vent et à une température basse : la vitesse du vent dépasse le seuil de 3.6 m/s;
- Inconfort thermique dû à une température élevée et à l'absence de mouvement d'air satisfaisant;
- Inconfort simultané dû à l'effet mécanique du vent et à une température élevée : la vitesse du vent dépasse le seuil mécanique de 3.6 m/s, mais son effet refroidissant est insuffisante au maintien le confort thermique.

Les limites de la zone de confort sont ajustables en fonction de la présence du rayonnement additionnel important ou d'un taux d'humidité relative élevé.

Dans un deuxième temps, **l'impact de la morphologie architecturale du stade sur les caractéristiques de l'écoulement de l'air à l'intérieur du stade a été étudié en soufflerie à couche limite**. Pour cela les stades modernes ont été regroupés en **grandes familles morphologiques**, ce qui a permis de choisir les configurations du stade à étudier. Les stades modernes montrent une grande diversité morphologique, en conséquence afin de pouvoir étudier l'effet de nombreux paramètres morphologiques une maquette à géométrie variable a été conçue. **Vingt différentes configurations** de la maquette ont été étudiées dans la soufflerie à couche limite : la vitesse moyenne et son écart-type ont été mesurés en de nombreux points au niveau des tribunes à la hauteur des spectateurs par anémométrie à fil chaud pour trois incidences du vent. Les caractéristiques de l'écoulement ont été décrites par des indices adimensionnels représentés par les variations de l'indice Ψ . Le Ψ intègre la vitesse moyenne et son écart type en un point i choisi au niveau des tribunes adimensionnés par la vitesse et l'écart-type d'un point de référence placé en amont du stade à 2 mètres de hauteur en zone dégagée (où l'écoulement n'est pas perturbé par les objets, bâtiments voisins). Les résultats des essais ont été représentés sous la forme des cartes d'iso valeurs de Ψ .

Les variations de l'indice Ψ caractérisent les conditions aérodynamiques moyennes ($\bar{\Psi}$) au niveau de l'intégralité des tribunes, et les conditions aérodynamiques "extrêmes" (fortement ventilées- $\Psi_{90\%}$, ou de moindre ventilation - $\Psi_{10\%}$). Le rapport de la valeur moyenne et des valeurs "extrêmes" de Ψ décrit l'homogénéité de l'écoulement (IH 10% et IH 90%).

Au cours des essais les effets de la variation des paramètres morphologiques suivants sur les caractéristiques de l'écoulement ont été étudié :

- La porosité de la façade;
- L'inclinaison de la toiture;
- Le débord de la toiture;
- Le plan du stade (football et football +athlétisme).

Les résultats des essais paramétriques ont démontré qu'il existe des corrélations entre les caractéristiques morphologiques du stade et les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes qui ont été décrites par les variations de l'indice adimensionnel Ψ .

L'effet de la porosité de la façade

Quatre types de porosité (représentée par le taux des ouvertures de la façade par rapport à la surface totale de cette dernière) ont été étudiés au cours des essais paramétriques :

porosité constituée de brèches

- périphériques horizontales uniformément réparties sans ou avec des écrans brise-vent;
- verticales concentrées dans les angles;
- verticales uniformément réparties.
- horizontales périphériques concentrées.

Les résultats ont montré que **non seulement le taux de porosité est un facteur qui influe** dans une large mesure **sur les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes, mais aussi la répartition des ouvertures sur la façade**. Une porosité de 0 à 40% constituée de **brèches périphériques horizontales uniformément réparties** induit une forte croissance de l'intensité de la ventilation au niveau des tribunes avec l'augmentation de la porosité de la façade. La répartition de la porosité influe sur l'homogénéité de l'écoulement. Un écoulement hétérogène a été observé pour une répartition moins uniforme de ce type de porosité.

Le deuxième groupe de porosité se constitue des configurations comportant des **brèches verticales : concentrées dans les angles et uniformément réparties**. **Les ouvertures verticales étroites qui se situent dans les angles induisent une ventilation globalement et aussi localement plus intense**, que les ouvertures verticales uniformément réparties tout au long de la périphérie. Une localisation des zones fortement ventilées a été observée à la proximité des brèches où l'écoulement rentre dans le stade en forme de jets. Ce type de porosité affecte globalement peu l'homogénéité de l'écoulement.

Le troisième groupe de porosité s'est constitué des **brèches horizontales concentrées** qui se situent entre la toiture et les gradins. Les résultats ont permis d'observer une ventilation plus intense - en particulier au niveau de la partie haute des tribunes (à l'endroit où l'écoulement rentre dans le stade) - pour une brèche de hauteur plus importante (entre la toiture et les gradins). D'ailleurs l'augmentation de la hauteur de la brèche a rendu l'écoulement au niveau des tribunes plus hétérogène.

L'analyse de l'ensemble de ces configurations comportant différentes porosités de la façade a permis de poser la conclusion suivante :

La croissance de taux de porosité entraîne une ventilation plus intense au niveau des tribunes, indépendamment de la localisation des brèches.

L'effet de l'inclinaison de la toiture

L'effet de quatre différentes inclinaisons de la toiture sur les caractéristiques de l'écoulement a été étudié en soufflerie :

- Toiture horizontale (inclinaison = 0°);

- Toiture descendante de 15° vers l'aire de jeu (inclinaison = -15°);
- Toiture montante de 15° vers l'aire de jeu (inclinaison = $+15^\circ$);
- Toiture montante de 30° vers l'aire de jeu (inclinaison = $+30^\circ$).

Il a été démontré que l'inclinaison de la toiture affecte significativement les caractéristiques de l'écoulement au niveau des tribunes : **une toiture descendante vers l'aire de jeu induit globalement une ventilation plus intense qu'une toiture horizontale**. Cependant, une toiture montante a tendance à rendre l'écoulement plus hétérogène et à induire l'apparition de zones fortement ventilées, en particulier au niveau de la partie haute des tribunes.

L'effet du débord de la toiture

Au cours des essais paramétriques l'effet de deux différents débords de toitures a été étudié :

- Toiture débordant vers l'extérieur du stade;
- Toiture de l'ouverture centrale (oculus) réduit, ce qui signifie un débord vers l'intérieur du stade.

Les résultats ont mis en évidence qu'**une toiture débordant vers l'extérieur augmente globalement l'intensité de la ventilation au niveau des tribunes**. Il a été également démontré, qu'**une toiture d'oculus réduit n'implique pas forcément une ventilation moins forte qu'une toiture horizontale non débordante** : les valeurs de Ψ dans les zones les plus fortement ventilées dépassent celles correspondant à une toiture horizontale. Cependant ces valeurs restent inférieures à celles d'une toiture débordant vers l'extérieur.

Une toiture d'oculus réduit semble atténuer la ventilation dans les zones de calme par rapport à une toiture horizontale.

L'effet du plan du stade

L'effet de la modification du plan du stade, notamment la réduction de la longueur du stade (stade de football), n'est pas d'effet significatif sur l'écoulement au niveau des tribunes : les phénomènes aérodynamiques observés sont de caractère identique à ceux correspondant à un stade de longueur plus importante (C1), en d'autres termes à un stade comportant une piste d'athlétisme.

Les résultats des essais paramétriques menés sur la maquette à géométrie variable ont été adimensionnés par la vitesse moyenne et l'écart type au point de référence. En conséquence, **les corrélations entre les paramètres morphologiques et les caractéristiques de l'écoulement permettent d'interpoler les résultats à des configurations possédant les mêmes caractéristiques morphologiques dans l'intervalle des gammes testées**.

L'étude de l'effet des paramètres morphologiques listés ci-dessus **sur les caractéristiques de l'écoulement a permis de développer une approche méthodologique d'évaluation du confort aérothermique des spectateurs** qui consiste à :

- associer les caractéristiques de l'écoulement (décrites par les variations de Ψ) des configurations présélectionnées aux données climatiques du site d'implantation du stade (fréquence d'occurrence de vitesse et de température);
- déterminer la durée de la période de confort aérothermique et de différentes sortes d'inconfort par rapport à la durée totale d'utilisation du stade sur la base de la zone de confort aérothermique.

Cette méthodologie permet d'évaluer la "qualité" aérodynamique de l'ambiance pour les configurations présélectionnées du point de vue du confort aérothermique des spectateurs sur la base des résultats des essais menés en soufflerie et des données climatiques du site d'implantation.

La fréquence du confort aérothermique dépend d'une part de la morphologie du stade et d'autre part des caractéristiques climatiques du site d'implantation. En conséquence, il n'existe pas une configuration universelle du stade qui conviendrait pour tous les types de climat. **La notion de "stade idéal" du point de vue du confort aérothermique des spectateurs varie selon les caractéristiques climatiques du site.**

Une évaluation réelle du confort aérothermique de huit configurations du stade présélectionnées basée sur la transposition des résultats des essais menés en soufflerie a été réalisée. Elle a permis de détecter les configurations qui présentent les caractéristiques le plus favorables du point de vue du confort aérothermique des spectateurs pour une position géographique donnée.

Outre le confort thermique, les caractéristiques climatiques, en particulier **le rayonnement solaire affecte également le confort visuel des spectateurs**. Le confort visuel dans les stades en lumière du jour est un champ peu exploré. Cependant, il existe **un critère concernant le confort visuel des spectateurs** et des téléspectateurs selon lequel **il faut éviter le contraste dû à l'ombre portée de la toiture projetée sur l'aire de jeu ensoleillée** [Garcia *et al.*, 1997]. En d'autres termes l'éclairage il est nécessaire que l'éclairage de l'aire de jeu en lumière du jour soit uniforme. Il peut être atteint soit dans le cas où l'intégralité de l'aire de jeu est ensoleillée, soit dans le cas où l'intégralité de l'aire de jeu est à l'ombre de la toiture et/ou des tribunes.

Le confort visuel des spectateurs en lumière du jour a été analysé à partir de l'uniformité d'éclairage de l'aire de jeu par un logiciel appelé BilEclInt (développé par la Division Eclairage et Colorimétrie du CSTB Nantes) pour trois positions géographiques et pour dix configurations du stade comportant des toitures opaques de différents inclinaison, débord et dimension. **Les résultats ont démontré que la gêne visuelle définie auparavant existe pendant la majeure partie de l'année pour les dix configurations étudiées.**

Les conditions lumineuses au niveau de l'aire de jeu sont également affectées par des caractéristiques photométriques du matériau de la couverture de la toiture. Une méthode de conception a été mise en œuvre qui permet de définir **la morphologie photométrique**, en d'autres termes la localisation de la partie opaque et transparente de la toiture dans le cas où il n'est pas favorable du point de vue du confort thermique que l'intégralité de la toiture soit couverte par un matériau transparent. La morphologie photométrique de la toiture peut être ainsi définie en fonction de la position géographique du stade par un outil expérimental appelé horizontoscope, afin d'augmenter la longueur de la période de l'éclairage uniforme de l'aire de jeu.

L'analyse du confort aérothermique des spectateurs a été ainsi complétée par l'évaluation du confort visuel. **Le confort aérothermique et le confort visuel des spectateurs devraient idéalement être évalués dans la démarche de la conception du projet à partir des approches méthodologiques développées sur le confort aérothermique et visuel dans le cadre de la présente étude.**

Les critères de confort thermique et de confort visuel sont liés au travers de l'échange par rayonnement. En conséquence, les exigences de confort aérothermiques doivent être confrontées à celles du confort visuel, ce qui permettrait de trouver un compromis entre ces deux types de critères.

Quant à l'ambiance acoustique dans les stades, un système unifié de critères acoustiques ne s'était pas encore développé : les exigences concernant l'intelligibilité et celles d'une ambiance acoustique favorisant "la communion" entre supporteurs semblent opposés. De plus, tandis qu'entre des critères de confort thermique et de confort visuel il existe une interaction complexe, entre ces critères et celui-ci de l'acoustique, l'existence de ce genre de relation n'était pas encore démontrée. Il y a cependant une relation dans la mesure où la qualité acoustique est également liée à la morphologie.

Les tribunes et la toiture créent un espace non seulement d'un point de vue géométrique qui détermine l'image architecturale du stade, mais encore une micro ambiance de qualité visuelle, aérothermique et acoustique qui la distingue de l'environnement proche.

Perspectives

Au regard de ces résultats les perspectives suivantes peuvent être envisagées pour compléter la présente étude :

- L'analyse de l'effet compensatoire ou renforçant de chaque paramètre climatique sur un autre paramètre devrait être approfondie et intégrée dans l'approche méthodologique de l'évaluation du confort des spectateurs.

- La pertinence de la zone de confort aérothermique délimitée par les critères aérothermiques et mécaniques devrait être validée pour les espaces semi extérieures de différentes sortes (gare, théâtre de plein air, terrasse de restaurant, café etc.) par des mesures *in situ* complétées par des enquêtes basées sur des questionnaires.
- La plage des configurations du stade étudiées pourrait être élargie par plus de variations morphologiques, en particulier par les configurations non symétriques.
- L'approche de la notion de confort acoustique dans les stades devrait être approfondie. Les critères d'une ambiance acoustique convenable aux spectateurs devraient être définis. Les conditions acoustiques dans plusieurs configurations géométriques du stade devraient être étudiées en tenant compte du taux d'occupation du stade, ainsi que de l'effet des différents traitements acoustiques des surfaces sur l'ambiance acoustique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AFE, 1992] Association Française de l'Eclairage en collaboration avec le Ministère de la Jeunesse et des Sports (1992) Recommandations relatives à l'éclairage des installations sportives; publiées par LUX Paris ISBN 2-85 604-021-7.
- [AFNOR, 7730]. Norme Française NF EN ISO 7730 (1995). Ambiances thermiques modérées – Détermination des Indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique. X 35-203, 30p.
- [Allard, 1998] Allard F. (1998). Natural Ventilation in Buildings. A design Handbook. James & James (Science Publishers) Ltd, 352 p. ISBN 1 873936 72 9.
- [Alvarez *et al.*, 1991] Alvarez S., Guerra J., Velazquez R. (19991); Climatic control Applications in Outdoor Spaces at EXPO'92. Proceedings de congrès PLEA (Passive and Low Energy Architecture) Séville 2001, pp189-193; Kluwer Academic Publishers London ISBN 0-7923-1418-2.
- [Armstrong, 1998] Armstrong F. L. (1998) The Thermal Physiological and Subjective Responses of Football supporters when Standing or Sitting at a Football Match Rapport BSc. 26p.
- [Arena, 2004] Evolution et finalité du sport contemporain. Une architecture adaptée aux nouveaux enjeux du sport : le stade. Rubrique 2500 ans d'histoire, chapitre L'époque contemporaine [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.arena-stadium.eu.org>> (consulté le 13.05.03)"
- [Arens *et al.*, 1986] Arens E., Gonzalez R., and Berglund L (1986) Thermal Comfort under an Extended Range of Environmental Conditions. ASHRAE Transactions, Vol. 92, part 1, pp. 18-26.
- [Arup, 2002] Ove Arup (2002) City of Manchester Stadium; Cahier Arup Associates + ArupSport.
- [Auliciems et Szokolay, 1997] Auliciems A., Szokolay S. V. (1997) Thermal comfort PLEA (Passive and Low energy Architecture) Notes, PLEA et Department of Architecture The University of Queensland Brisbane 4072; ISBN 0 86776 729 4.
- [Aynsley, 1974] Ansley R. M. (1974) Effects of Airflow on Human Comfort, Building Science, Vol. 9 pp 91-94, Pergamon Press.
- [Balázs et Szalay, 1983] Balázs K., Szalay Z. (1983) Szélkomfort az épített környezetben, Építéstudományi Intézet Tanulmánya Budapest 156pp.

- [Blows, 1998] site internet consulté le 15.02.2005
http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&list_uids=9887686&dopt=Abstract
- [Bluestein *et al.*, 1999] Bluestein M., Zecher J. (1999) A New Approach to an Accurate Wind Chill Factor, Bulletin of the American Meteorological Society.
- [Bondy, 1998] Bondy J.P., Modernisation des stades de football : confort, visibilité et sécurité, CSTB Magazine, 1998, n°115, pp. 42-46
- [Bouyer, 2004] Bouyer J. (2004) Caractérisation du confort thermique dans les espaces semi-extérieurs. Application aux grands stades - Rapport de DEA EN-CAPE 04.75 R- v0. 104p.
- [Chase *et al.*, 1995] Chase J., Healey M. (1995) The spatial externality effect of football matches and rock concerts, Applied Geography Vol. 15 (N°1) p 18-34, Butterworth and Heinemann Ltd.
- [CIE, 1987] Commission Internationale de l'Eclairage (1987) Vocabulaire International de l'Eclairage; Bureau Centrale de la Commission Electrotechnique Internationale; ISBN3-900734070.
- [Colisé, 2002] site internet, consulté en Octobre 2002 :
http://alpha2.civ.uniroma2.it/~callari/tes_found.html.
- [de Dear *et al.*, 1999] de Dear R., Pickup J. (1999) An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT_SET*) - Part II - Applications, Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology, edited by R. de Dear and J. Potter (Macquarie University; Sydney) ISBN 1 86408 5436.
- [Delpech *et al.*, 2005] Delpech P., Baker C. J., Blackmore P.A., Koss H., Sanz-Andres A., Stathopoulos, Willemsen E. (2005) Pedestrian wind comfort assessment criteria: A comparative case study, Proceedings de EACWE4 – The Forth European & African Conference on Wind Engineering Prague, Czech Republic 11-15 July 2005.
- [Delphes, 2002] site internet consulté en Novembre 2002 :
<http://www.people.ku.edu/~jyounger/Greece/>
- [Depecker *et al.*, 1989] Depecker P., Izard J.L., Traisnel J.P. (1989) Qualité thermique des ambiances; AFME, Collection cahiers pédagogiques Thermique et Architecture, Paris; 67 p.
- [Deval *et al.*, 1983] Deval J.-C., Berger X. (1983) Le confort en climat chaud; Séminaire REXCOOP habitats climatiques, Laboratoire d'Ecothermie Solaire CNRS, 28p.
- [Dufresne de Virel, 1995(1)] Dufresne de Virel M. (1995) Stade de Beaujoire. Ambiances climatiques Rapport interne du CSTB Nantes EN-SC 95.62 C.

- [Dufresne de Virel, 1995(2)] Dufresne de Virel M. (1995) Stade de Gerland. Ambiances climatiques; Rapport interne du CSTB Nantes EN-SC 95.33 C.
- [Dufresne de Virel, 1995(3)] Dufresne de Virel M. (1995) Contrôle des ambiances pour le grand stade de Saint-Denis Rapport interne du CSTB Nantes EN-SC 95.05 C.
- [ECOBUILD, 2005] site internet, consulté en Juin 2005 :
<http://www.egt.bme.hu/ecobuild/main.htm>
- [Eurocode Partie 2-4, 1995] Eurocode Partie 2-4 (1995) ENV 1991-2-4 Part 2-4: Actions on structures – Wind actions.
- [Fanger, 1970] "Fanger P. O. (1970) Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering; McGraw-Hill Book Company ISBN 0-07-019915-9."
- [Fiala *et al.*, 1999] Fiala D., Lomas K. J. (1999) Application of a computer model Predicting Human Thermal Responses to the Design of Sports Stadia. CIBSE '99, Harrogate UK, Conference Proc., p 492 -499.
- [Fiori, 2004] Fiori S. (2004) Eclairage et luminance; page internet :
<http://www.montpellier.archi.fr/SITES/sfiori/Cours5.pdf> consulté le 05.03.2004.
- [Galeou *et al.*, 1989] Gaelou M., Grivel F., Candas V. (1989) Le confort thermique : aspects physiologiques et psychosensoriels. Etude bibliographique. Strasbourg CNRS; 113p.
- [Gandemer et Guyot, 1976] Gandemer J., Guyot A. (1976) Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. Guide méthodologique et conseils pratiques. La Documentation Française 130 p.
- [Gandemer *et al.*, 1980] Gandemer J., Barnaud G., Biétry J. (1980) Aérodynamique Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Reef - II Sciences du Bâtiment; Maulde et Renou Aisne; 106 p.
- [Gandemer et Guyot, 1981] Gandemer J., Guyot A. (1981) La protection contre le vent. Aérodynamique des brise-vent et conseils pratiques; Cahier du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
- [Gandemer, 1994] Gandemer J. (1994) Etude d'impact aérodynamique du Grand Stade à Saint Denis. EN-SC 94.34. Rapport interne du CSTB Nantes, 44 p.
- [Garcia *et al.*, 1997] Garcia M., Carré S. (1997) Evaluation de l'efficacité de la couverture transparente du Stade de France, Rapport interne du CSTB EN-ECL 97.12.C.

- [Gerland, 2003] site internet, consulté en Mars 2005 :
http://stadiony.net/stadiums/france.php?incStadium=stade_de_gerland
- [Gravelaine, 1997]. Gravelaine F. (1997) Le Stade de France. 200 p. Editions Le Moniteur; ISBN 2 281 19101.X.
- [Hoppe, 1999] Hoppe P. (1999) The physiological equivalent temperature PET-an universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, *International Journal of Biometeorology* 43 (2) pp 71-75.
- [Hunt *et al.*, 1976]. Hunt J. C. R., Poulton E. C., Mumford J. C. (1976) The effects of wind on people: new criteria based on wind tunnel experiments, *Building and Environment* 11 (1976) 15-28.
- [IIDRIS, 1997]. IIDRIS Index International et Dictionnaire de Réadaptation et de l'Intégration Sociale ; page internet consulté le 05.09.2005 :
<http://www.med.univ-rennes1.fr/iidris/cache/fr/19/1974>
- [Isyumov, 1978] Isyumov (1978) Studies of the pedestrian level wind environment at the boundary Layer Wind Tunnel Laboratory of the University of Western Ontario; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* Vol. 3 pp 187-200.
- [John *et al.*, 2000] John G. and Sheard R. (2000) *Stadia. A Design and Development Guide*. Oxford: Architectural Press Bath, 267 p. ISBN 0 7506 4534 2.
- [Kent *et al.*, 2001] Kent B. Pandolf K. B., Burr R. E. (2001) *Medical Aspects of Harsh Environments, Volume 2. Textbooks of Military Medicine. Chapitre 2 Human Adaptation to Hot Environments*, Washington, DC: Borden Institute, Office of the Surgeon General, US Army Medical Department ISBN 0-16-051184-4. Site internet consulté le 24 Mars 2005:
<http://www.bordeninstitute.army.mil/medaspo/fharshenvrnmnts/default.html>
- [Kindler, 1969] Kindler J. (1969) *Matematikai statisztika*. Budapest Muszaki Egyetem Egyetemi jegyzet.
- [Mayer, 1993] Mayer E. (1993) Objective criteria for thermal comfort, *Building and Environment* Vol. 28 N°4, pp399-403.
- [Melbourne, 1978] Melbourne W. H. B. (1978) Criteria for environmental wind conditions; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* Vol. 3 pp 241-249.
- [Moreau, 1999] Moreau S. (1999) *Caractérisation et développements aérodynamiques de l'espace intermédiaire en climat tropical humide: Conception d'une architecture de confort adaptée à la contrainte cyclonique* - thèse de doctorat, Université de Nantes ISITEM – Ecole d'Architecture de Nantes, 294 p.

- [Moreau, 2002 (1)] Moreau S. (2002) Climatic Ambience in Istanbul Stadium Rapport interne du CSTB Nantes EN-CAPE 02.92C - v0.
- [Moreau,2002 (2)] Moreau S. (2002) Contrôle de l'exposition au vent des tribunes du Stade Delaune – Reims Rapport interne du CSTB Nantes EN-CAPE 02.50C - v0, 29p.
- [Moreau *et al.*, 2001] Moreau S., Fleury E., Palier P., Millet J-R., Villenave J.-G., Patry D. (2001) Fondements physiques du confort en climat chaud. Impact du facteur turbulent sur la perception de confort. Qualification des brasseurs d'air – étude du CSTB, EN-CAPE 01.128-V0 2001. [Moreau, 2002] "Moreau S. (2002). Climatic Ambience in Istanbul Stadium EN-CAPE 02.92 C–vo; Internal report CSTB Nantes 32 p.
- [Milet, 2002] site internet consulté en Novembre 2002 :
<http://www.utexas.edu/courses/classicalarch/images3/miletusplan.gif>
- [New Windchill, 2001] site internet consulté en Juillet 2004
<http://www.mountwashington.org/weather/wind-chill.html>
- [Nikopoulou *et al.*, 2001] Nikopoulou M., Baker N., Steemers K. (2001) Thermal comfort in urban spaces : understanding the human parameter; Solar Energy Vol. 3, pp. 227-235. Elsevier science Ltd. Royaume Uni.
- [Norme statistique, 1983] Recueil de norms françaises des statistiques, tome 1, vocabulaire, estimation et tests statistiques (1983) 2dité par l'AFNOR (Association Française de NORmailisation).
- [Olgyay, 1967] Olgyay V. (1967) Design with Climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism; Princetown University Press, Princetown New Yersey.
- [Olympie, 2002] site internet consulté en Decembre 2002 :
<http://www.culture.gr/2/21/211/21107a/00/lk07a02a.jpg>
- [Olympie, 2003] site internet consulté en Janvier 2003 :
<http://www.hellenism.com/olympics/images/ancient-olympia/map2.jpg>
- [Parc des Princes, 2002] site internet consulté en Octobre 2002 :
http://perso.wanadoo.fr/psgworld/parc_des_princes.jpg
- [Penwarden *et al.*, 1973] Penwarden A. D. (1973) Acceptable wind speeds in towns, Building and Science, Vol. 8, N° 3., pp 259-267.
- [Perrier, 2005] site internet consulté en Février 2005 :
<http://www.fao.org/Wairdocs/x5164F/X5164f0a.htm>
- [Perraudeau, 1999] Perraudeau M. (1999) Lumière et couleur; Techniques de l'ingénieur.

- [Radunz, 2003] Radunz T.L., La notion de confort thermique dans les grands stades, Rapport de DEA EN-CAPE 03.67 R- v0. 112p. Ambiances Architecturales et Urbaines, Ecole d'architecture de Nantes, Université de Nantes, 2003, 112p.
- [RPBW, 2002] site internet consulté en Novembre 2002 : <http://www.rpbw.com/>
- [Schmidt, 2004] SCHMIDT T., Les stades olympiques de 1896 à 1936, Les stades olympiques de 1948 à nos jours (Ie, Iie et IIIe partie), Revue Olympique, Sport et Technique [en ligne] (consulté le 10.04.04) Disponible sur : <http://www.aafla.org/OlympicInformationCenter/RevueOlympique>
- [Soligo *et al.*, 1998] Soligo M. J., Irwin P. A., Williams C. J., Schuyler G. D. A comprehensive assessment of pedestrian comfort including thermal effects, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 77&78 (1998) pp. 753-766.
- [Spagnolo *et al.*, 2003] Spagnolo J., de Dear R.; A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia; *Building and Environment*, Volume 38, Issue 5, May 2003, Pages 721-738.
- [Sturzebecher et Ulrich, 2001] Sturzebecher P., Ulrich S. (2001) *Architektur für Sport. Neue Konzepte, internationale Projekte für Sport und Freizeit*; pp 278; Verlag Bauwesen Berlin, ISBN 3 345 00737 1.
- [Szokolay, 1980] Szokolay S. V. *Environmental Handbook* (1980); The Construction Press, London, 1980, ISBN 0860958132.
- [Szokolay, 1996] Szokolay S. V. (1996) *A napsugàrzàs geometriàja*; PLEA Notes, Ybl Miklos Muszaki Foiskola ISBN 0 86776 634 4.
- [Szucs, 2004(1)] Szucs A. (2004). *Stadia in the environment – environment in stadia*. Proceedings of the 21st International Conference of Passive and Low energy Architecture (PLEA), Eindhoven, Pays-Bas, p. 169-174. ISBN 90-386-1636-8.
- [Szucs, 2004(2)] Szucs A. (2004). *Reflections about thermal comfort of spectators in stadia*. Bulletin of the Faculty of Architectural Engineering, Budapest University of Technology and Economics, Hungary ISSN 1785-9565.
- [Szucs *et al.*, 2005(1)] Szucs A., Moreau S., Allard F. (2005). *Influence of canopy on airflow in stadia*. The Fourth European & African Conference on Wind Engineering, Prague, Czech Republic; ISBN 80-86246-26-4.
- [Szucs *et al.*, 2005(2)] Szucs A., Allard F., Moreau S. (2005) *Effect of Façade Porosity on Air Flow in Stadia*, 7th Nordic Building Physics Symposium, Reykjavik, Iceland; ISBN 9979 9174 5 8.
- [Szucs *et al.*, 2005(3)] Szucs A., Allard F., Moreau S. (2005) *Effect of roof on thermal and visual comfort of spectators in stadia*. IV Congreso Latinoamericano Sobre Confort y Comportamiento Termico de las Edificaciones Mexico , May 2005.

- [Szucs *et al.*, 2005(4)] Szucs A., Moreau S.(2005) Aszel, az epulet es az ember (en hongrois) Epiteszspektrum (journal hongrois d'architecture et de science) Février 2005 ISSN 1587 8724,
- [T et A, 1990 -1991] Techniques et Architecture, Les lieux du sport, revue international d'architecture et de design Décembre 1990- Janvier 1991, Editions Regirex-France, Paris, ISSN 0373-0719.
- [Vigneau, 1998] Vigneau F. (1998) Les espaces du sport. Collection encyclopédique Que sais-je?, Presses Universitaires de France ISBN 2 13 049432 3.
- [Vinet, 2000] Vinet J. (2000) Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort sur les espaces extérieurs, thèse Mécanique, Thermique et génie Civil, Ecole d'Architecture de Nantes, 245p.
- [Weber *et al.*, 1995] W. Weber, B. Lachal, H. Drexler, P. Gallinelli, D. Gonzalez, F. Butera (1995) Pascool Electronic Metahandbook P.E.M. passive cooling design guidelines for Mediterranean climate & countries Version 1.2.
- [Worldstadiums, 2002] site internet, consulté en Octobre 2002 : <http://www.worldstadiums.com>