

Wenk

Guide précis d'aide à la construction des modèles réduits

Pour utilisation et mesures sous ciel artificiel au CSTC

Avril 2008

***Bodart Magali
Deneyer Arnaud
Moenssens Nelly***

Centre Scientifique et Technique de la Construction

Division Physique du Bâtiment et Climat intérieur
Avenue Pierre Holoffe 21
B-1342 Limelette
Belgique
Tel : +32 2 655 77 11
Fax : +33 2 653 07 29
Website : www.bbri.be

Université Catholique de Louvain

Architecture et Climat
Place du Levant 1
B-1348 Louvain-la-Neuve
Belgique
Tel : +32 10 47 21 42
Fax : +32 10 47 21 50
Website : <http://www-climat.arch.ucl.ac.be>

WenK

Instituut voor Wetenschap en Kunst
Afdeling Architectuur, St.-Lucas Gent
Hoogstraat, 51
B-9000 Gent
Belgique
Tel : +32 9 225 10 00
Fax : +32 9 225 80 00
Website : <http://www.architectuur.sintlucas.wenk.be/>

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	<i>Propriétés physiques de la lumière et influence de l'échelle sur celle-ci</i>	2
1.2	<i>Utilisation des modèles réduits comme outil de conception</i>	3
1.3	<i>Utilisation des modèles réduits comme outil de recherche</i>	3
1.4	<i>Limitations des modèles réduits</i>	3
2	Instrumentation disponible	4
2.1	<i>Eclairage du ciel (Mirror Box et ciel artificiel à 1 lampe)</i>	4
	2.1.1 Mirror box	4
	2.1.2 Ciel artificiel à une lampe	5
	2.1.3 Soleil artificiel à une lampe	7
3	EVALUATION ET ANALYSE DES RESULTATS	8
3.1	<i>Analyse qualitative</i>	8
	3.1.1 Observations directes	8
	3.1.2 Observations photographiques ou par caméra digitale	8
3.2	<i>Analyses quantitatives</i>	9
	3.2.1 Mesures d'éclairement	9
	3.2.2 Mesures de facteur de lumière du jour (ciel couvert CIE)	9
	3.2.3 Mesures de luminance	10
4	GUIDE PRECIS A LA CONSTRUCTION DES MODELES REDUITS	11
4.1	<i>L'échelle et la taille des modèles</i>	11
4.2	<i>Géométrie du modèle et modélisation des parois.</i>	14
4.3	<i>Disposition du matériel de mesure</i>	15
4.4	<i>Couleurs et coefficients de réflexion des parois</i>	17
4.5	<i>Type de matériaux constitutifs des parois et raccordement de ces parois entre elles</i>	17
4.6	<i>Modélisation du sol extérieur et des locaux qui ne sont pas situés au rez-de-chaussée</i>	18
4.7	<i>Modélisation des obstructions extérieures</i>	18
4.8	<i>Modélisation des ouvertures</i>	18
4.9	<i>Adaptabilité du modèle</i>	19
5	ANNEXES	20
5.1	<i>Annexe A :Prises de vues - illustrations</i>	20
5.2	<i>Annexe B : Coefficients de réflexion de certains matériaux et cartons dont les coefficients de réflexion se rapproche le plus de ceux-ci</i>	23
5.3	<i>Annexe C : Mesures colorimétriques de cartons (Y = coefficient de réflexion)</i>	24
5.4	<i>Annexe D : Tableau donnant les valeurs moyennes recommandées et les valeurs minimales de facteurs de lumière du jour en fonction du type de bâtiment et de l'activité.</i>	26
5.5	<i>Annexe E : Modélisation de la voûte céleste à partir de la répartition de Tregenza</i>	27
6	Bibliographie	28

1 INTRODUCTION

L'éclairage naturel est un des éléments clés de tout projet d'architecture réussi. Cependant, l'extrême complexité du comportement de la lumière naturelle conduit de nombreux architectes à négliger les qualités intrinsèques de l'éclairage naturel au profit d'un éclairage artificiel plus adaptable [DH 2001]. Néanmoins, la lumière naturelle est le mode d'éclairage le plus agréable, le plus performant et le plus économique pour peu qu'on puisse s'en préserver lorsque c'est nécessaire. Sa variabilité se montre extrêmement bénéfique pour le confort des occupants. Son utilisation judicieuse est un atout majeur pour développer les qualités architecturales, énergétiques et environnementales d'un bâtiment. La lumière naturelle est donc l'éclairage d'ambiance par excellence.

La lumière naturelle apparaît comme un moyen architectural particulièrement riche. Elle peut révéler un bâtiment par son action sur les espaces, les formes, les structures, les matériaux, les couleurs et la signification de l'édifice. De plus, elle est au cœur même de la définition du geste créateur : exprimer, c'est-à-dire mettre en lumière, extraire de l'ombre.



**Figure 1 :Fréjus- France -
Lycée Albert Camus, arch Sir
N. Foster**

En terme d'éclairage, il est également important pour les concepteurs de pouvoir estimer l'efficacité de leur choix, que ce soit au point de vue des performances énergétiques (degré de dépendance du bâtiment en terme d'éclairage artificiel) ou des performances humaines (confort visuel). La construction d'une maquette peut être une solution très intéressante pour ce genre d'étude. En effet, l'effet visuel que l'on ressent lorsqu'on place cette maquette sous ciel artificiel ou sous ciel réel et que l'on regarde simplement dans la maquette est identique à celui que l'on ressentira dans le local modélisé. Cette sensation visuelle n'est pas reproductible par un autre moyen comme l'utilisation d'un logiciel de calcul d'éclairage car ce dernier ne permet pas d'intégrer l'effet 3D que l'on ressent en situation réelle.

Depuis des centaines d'années, les architectes utilisent les maquettes aussi bien pour visualiser la forme du bâtiment que pour concevoir ses façades ainsi que ses espaces intérieurs.

Une maquette devrait pouvoir être utilisée comme outil de conception d'éclairage. En effet, en portant un soin particulier à quelques points précis lors de la construction la maquette du projet, celle-ci devrait être tout à fait utilisable pour la réalisation d'études d'éclairage.

1.1 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA LUMIÈRE ET INFLUENCE DE L'ÉCHELLE SUR CELLE-CI

Contrairement aux modèles étudiant la thermique et l'acoustique, les modèles physiques étudiant la lumière ne nécessitent aucune correction d'échelle et peuvent donner des résultats très précis. La longueur d'onde de la lumière visible est si petite, en comparaison avec les dimensions d'un modèle réduit, que son comportement n'est que très peu affecté par le passage à l'échelle. En tenant compte de la perception visuelle humaine, on ne discerne aucune différence visuelle entre la réalité et un modèle réduit.

Lorsqu'on construit précisément la maquette d'un local, c'est-à-dire en respectant scrupuleusement sa géométrie ainsi que les caractéristiques de ses parois intérieures (couleur, brillance, ...) et de son mobilier, on retrouvera la même quantité et qualité de lumière que celle que l'on a dans le local réel (sous des conditions de ciel identiques). L'impression visuelle que l'on aura sera très proche, voire identique, à celle que l'on ressentira dans le local réel.

1.2 UTILISATION DES MODÈLES RÉDUITS COMME OUTIL DE CONCEPTION

Parmi les différentes techniques disponibles pour le concepteur, le modèle réduit combine divers avantages qui lui confèrent une attraction particulière quant à l'étude de l'éclairage naturel :

- Un modèle réduit est un outil de design très simple, très didactique qui peut être compris très facilement sans trop entrer dans le domaine théorique.
- Les modèles réduits permettent de réaliser des études précises avec un petit budget. Des modèles très simples peuvent déjà donner une bonne impression visuelle de l'environnement lumineux.
- Construire un modèle réduit est une manière très facile d'étudier l'éclairage naturel dans un local de forme complexe, comportant des espaces de géométrie non rectiligne. Ceci s'avère beaucoup plus long et fastidieux si l'on désire modéliser cet espace par ordinateur.
- Une maquette permet aussi d'étudier rapidement l'effet de variation de la géométrie, des coefficients de réflexion ou des couleurs des matériaux utilisés. On peut donc prendre rapidement des décisions concernant les effets visuels ou les niveaux de luminance.
- Les modèles réduits fournissent des données qualitatives à partir d'observations visuelles ou de photographies. Les informations fournies peuvent donc permettre au concepteur de déceler d'éventuels problèmes d'éblouissement ou d'autres problèmes relatifs au confort visuel.
- Dans les modèles réduits, on peut aussi mesurer les valeurs quantitatives d'éclairement ou de luminance atteintes. Ces valeurs permettent alors de dimensionner l'éclairage artificiel nécessaire, de calculer la consommation électrique et les charges de refroidissement qui en résultent.
- L'éclairage naturel dans un bâtiment peut aussi être étudié de manière dynamique au moyen d'une caméra vidéo, que ce soit sous un ciel artificiel ou sous ciel réel. Cela permet donc de visualiser les variations d'éclairage dans la pièce modélisée.
- Il est souvent moins onéreux de construire une maquette et de la tester sous ciel artificiel que de faire réaliser une étude d'éclairage par modélisation informatique, par une organisation spécialisée.
- De plus, un modèle réduit peut aussi être utilisé pour étudier d'autres aspects que l'éclairage naturel dans un bâtiment (composition spatiale, utilisation des couleurs, mobilier, intégration dans le site,...).

1.3 UTILISATION DES MODÈLES RÉDUITS COMME OUTIL DE RECHERCHE

Dans l'étude des performances de nouveaux concepts en éclairage naturel, des modèles réduits sont utilisés pour pré-valider ces concepts.

Ils peuvent aussi être utilisés pour étudier les caractéristiques de nouveaux matériaux tels que, par exemple, des éléments prismatiques ou holographiques. Dans ce cas, les études sur des maquettes permettent de transférer les caractéristiques de ces systèmes vers des programmes informatiques. En effet, il est nécessaire de comprendre complètement les performances et les caractéristiques de ces éléments avant de les simuler par ordinateur.

1.4 LIMITATIONS DES MODÈLES RÉDUITS

- Les modèles réduits peuvent être construits de manière très précise, en simulant chaque détail de l'espace. Cependant un modèle réduit très précis et très détaillé coûte très cher et ne rencontre en général pas les caractéristiques de flexibilité requises dans les études d'éclairage. Il peut malgré tout être utilisé pour obtenir une représentation précise du projet finalisé e qui soit intéressante pour l'architecte et le client.
- Une des limitations inhérente aux modèles réduits provient du fait qu'on ne peut pas, à l'heure actuelle, réduire les matériaux utilisés (briques, vitrages,...). L'utilisation de matériaux réels à l'échelle dans les maquettes peut provoquer des erreurs dans les résultats quantitatifs.
- L'éclairage artificiel est difficile à intégrer dans les études d'éclairage sur modèles réduits. L'intensité de l'éclairage artificiel peut être simulée, contrairement à la distribution de luminance des luminaires, ce qui n'est pas sans poser de multiples problèmes.

2 INSTRUMENTATION DISPONIBLE

Les études d'éclairage naturel peuvent être menées sous ciel réel ou ciel artificiel. L'avantage d'un ciel artificiel est que son environnement lumineux est stable dans le temps et qu'il permet de réaliser des mesures sous des conditions lumineuses précises, ce qui rend la comparaison entre divers projets possible. Les mesures sous ciel réel posent cependant quelques problèmes pratiques dans la mesure où le ciel est très variable dans le temps, surtout en Belgique. De plus, il faut disposer d'instrumentation très complexe si on veut le caractériser de manière précise.

Pour étudier l'éclairage naturel en laboratoire, on dissocie en général l'éclairage qui vient du ciel et celui qui vient du soleil. Une simple superposition des mesures réalisées sous un ciel et un soleil artificiel permet d'obtenir les résultats pour des conditions de ciel ensoleillé.

2.1 ECLAIRAGE DU CIEL (MIRROR BOX ET CIEL ARTIFICIEL A 1 LAMPE)

Le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) dispose d'un laboratoire d'éclairage naturel situé à sa station expérimentale de Limelette.

Ce laboratoire propose deux types de ciel ayant des objectifs différents.

2.1.1 Mirror box

Le premier est un ciel à miroirs aussi appelé « mirror box ». Il est composé essentiellement d'une enceinte revêtue de miroirs très réfléchissants et d'un plafond lumineux constitué de tubes fluorescents masqués par un matériau diffusant.

Ce type de ciel a les avantages d'être très didactique et permet d'étudier des modèles relativement grands tout en limitant la durée des mesures et donc le coût.

Il permet de simuler un ciel couvert CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) et les résultats que l'on peut tirer des observations ou des mesures réalisées sous ce type de ciel sont déjà relativement précis. Il permet, entre autre, de mesurer le facteur de lumière du jour. Cependant, la distribution de lumière est limitée à ce modèle de ciel couvert CIE. Il faut cependant être conscient du fait que la présence de la maquette modifie la distribution de la lumière car elle masque certains miroirs et joue un rôle qui peut parfois être non négligeable sur

les interreflexions entre ceux-ci. Pour limiter l'influence de la maquette sur la distribution de lumière dans la mirror box, il convient de limiter la hauteur de la maquette. Celle-ci ne dépassera pas 70 cm de haut.

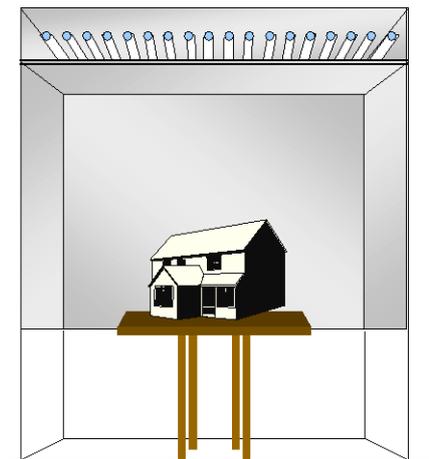


Figure 2 : Coupe schématique de le Mirror Box



Figure 3 : Exemple d'étude d'éclairage naturel dans la « mirror box » : vue extérieure



Figure 4 : Exemple d'étude d'éclairage naturel dans la « mirror box » : vue intérieure

2.1.2 Ciel artificiel à une lampe

Le second ciel est un ciel de type dôme qui permet de simuler toute distribution de ciel. Il se compose d'une source lumineuse et d'une table tournante sur laquelle est positionnée la maquette. La source lumineuse modélisant le ciel est fixe et ne simule qu'une partie de la voûte céleste (1/145^{ème} plus précisément). Le dôme complet peut être reconstitué via les 145 angles de vues différents qui sont pris par la maquette grâce au système de double rotation (rotation selon deux axes orthogonaux).

L'éclairage intérieur, quelle que soit la distribution de luminance du ciel, peut ainsi être calculé en pondérant et en superposant les résultats obtenus à partir des 145 mesures [Tre 1987], voir 5.5.

Une fois ces mesures réalisées, toute combinaison de ciel peut être interpolée. Les mesures sont automatisées, ainsi que la superposition des résultats de celles-ci. Il suffit donc d'environ 70 minutes pour caractériser le modèle, quelle que soit l'heure ou le type de ciel choisis. Il faut cependant savoir que si ce type de ciel permet des mesures précises d'éclairage naturel, il ne procure pas de vue directe des ambiances lumineuses atteintes dans le modèle, à l'opposé de la mirror box. Cependant, une recombinaison informatique des images prises lors du positionnement aux 145 positions permet de recomposer une vue de l'ambiance intérieure du modèle.

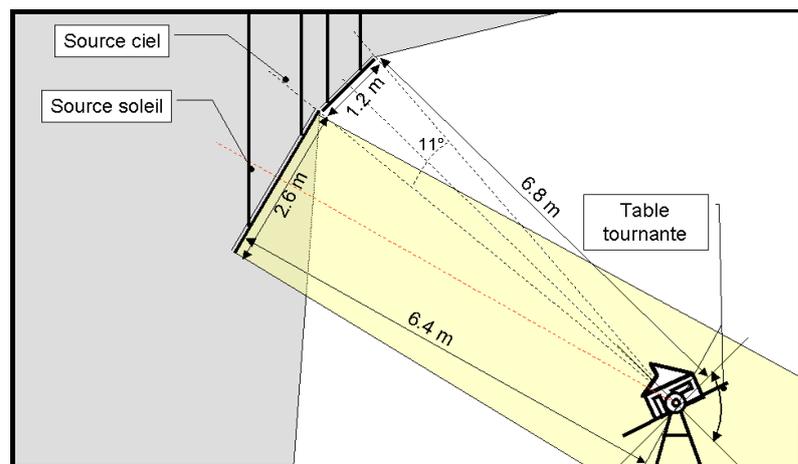


Figure 5 : Vue schématique du ciel et du soleil artificiel à une lampe

2.2 ECLAIRAGE DIRECT (DU SOLEIL)

2.2.1 Soleil mécanique

Le soleil mécanique est un outil didactique qui permet de visualiser notre perception du mouvement du soleil. Il est constitué d'une lampe mobile se déplaçant autour d'un modèle réduit et décrivant le mouvement du soleil pour une latitude donnée (point fixe).

Pour chaque simulation (jour de l'année), le soleil décrit un cercle qui correspond à la base d'un cône dont l'axe principal est incliné. L'angle d'inclinaison de cet axe correspondant à la latitude du site considéré. La longueur du côté du cône dépend du jour choisi (+ longue en hiver et + courte en été).

Dans le cas ci-présent, le côté du cône est matérialisé par un câble qui contrôle le mouvement vertical de la lampe (réalisé par simple gravité). La source lumineuse se déplace librement de bas en haut sur un bras courbe mobile qui tourne autour de la maquette selon un axe vertical. Ce bras est motorisé et c'est lui qui, via un contrôle télécommandé, assure le fonctionnement de l'ensemble.

Les manipulations de cet outil sont donc extrêmement simples puisqu'il s'agit :

- De fixer la position du point fixe (sommet du cône) en fonction de la latitude du lieu considéré
- de modifier la longueur du câble en fonction du jour simulé. Un jour (le 21) peut être modélisé pour chaque mois de l'année.

Sous ce simulateur, aucune mesure n'est effectuée. Il n'est utilisé que pour visualiser le déplacement du soleil et les ombres ou taches solaires associées. **Les utilisateurs sont donc appelés à utiliser leurs appareils photo ou caméras personnels.**

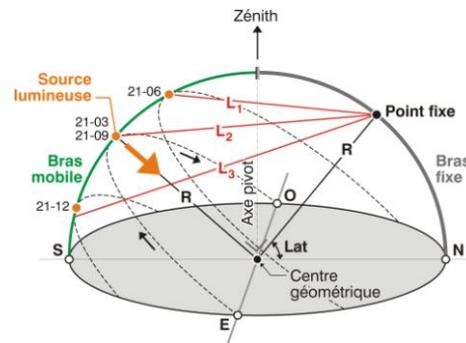


Figure 6: Principe de fonctionnement du soleil mécanique

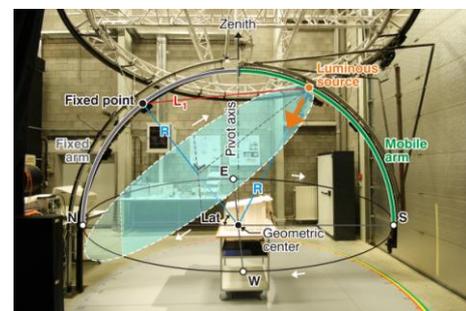


Figure 7: Soleil mécanique avec son principe de fonctionnement superposé

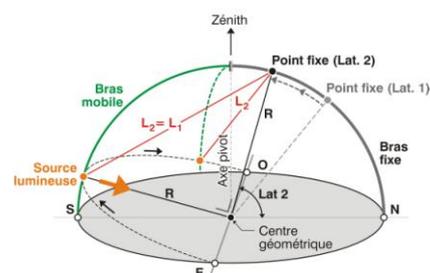
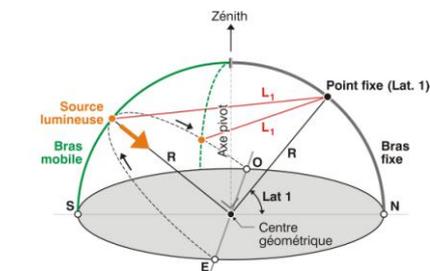


Figure 8: La modification de localisation ne nécessite pas d'ajustement de la longueur du câble.

2.2.2 Soleil artificiel à une lampe

Le soleil artificiel à une lampe est un simulateur qui permet une étude plus détaillée que le soleil mécanique car il combine observations et mesures.

Il se compose de 91 petites lampes halogènes fixées au plafond. Comme la source lumineuse est fixe, son mouvement relatif est réalisé par la rotation de la maquette autour de deux axes indépendants. Il peut être utilisé pour évaluer l'aspect visuel induit par les rayons solaires. Cette observation est directe. Elle doit cependant être superposée aux valeurs obtenues lors des mesures sous ciel diffus, afin de refléter la réalité obtenue par combinaison du ciel clair avec le soleil.

Les modèles sont fixés sur le plateau tournant via un système d'attaches réglables en fonction de la taille du modèle. Une fois le modèle installé, il est correctement orienté et positionné par rapport à la référence donnant le sud géographique.

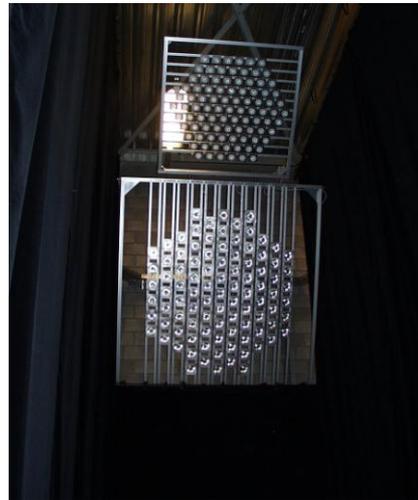


Figure 9: Photo du ciel artificiel (en haut) et du soleil artificiel (en bas)

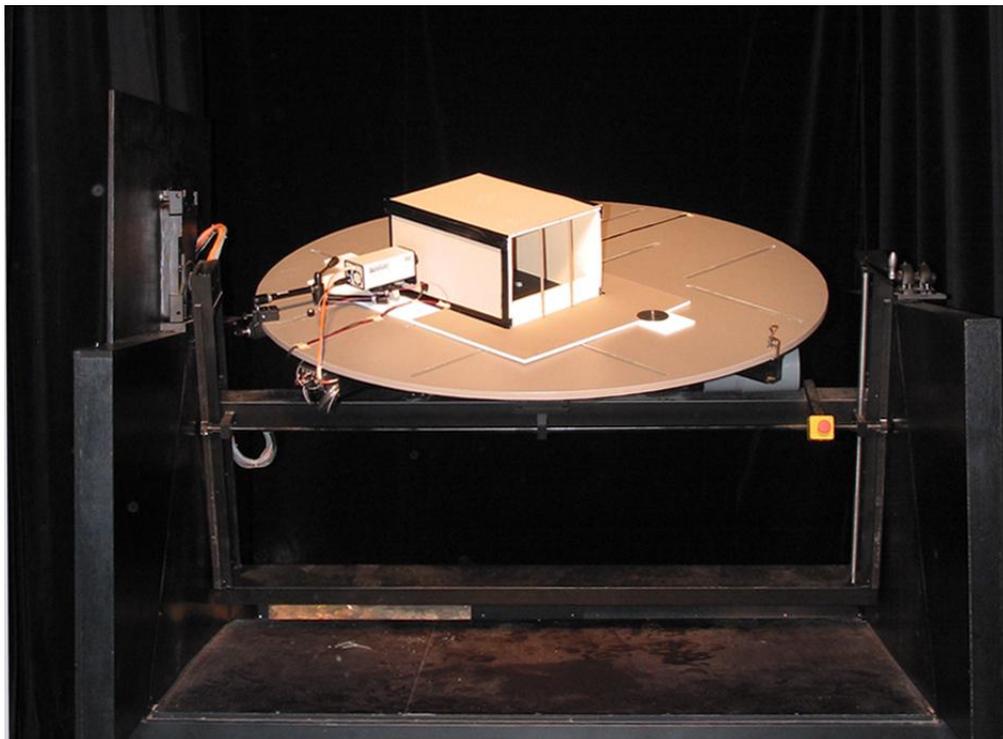


Figure 10 : Photo de la table tournante

3 EVALUATION ET ANALYSE DES RESULTATS

Les résultats que l'on obtient lors de mesures sur maquettes sont de deux ordres. Il s'agit soit de valeurs qualitatives, soit de valeurs quantitatives.

3.1 ANALYSE QUALITATIVE

3.1.1 Observations directes

Il y a plusieurs aspects de l'éclairage naturel qui ne proviennent pas de mesures quantitatives. Des aspects comme l'éblouissement, les contrastes ou le confort visuel sont étudiés par des observations visuelles directes ou photographiques.

Pour réaliser ce genre d'observations, il faut pouvoir placer l'œil de l'observateur ou la caméra que l'on utilise afin de visualiser la scène à une hauteur qui correspond à la hauteur réelle de l'œil dans le local. Habituellement, pour des études de l'éblouissement provenant d'une fenêtre, les directions principales de vue à étudier seront, de manière générale, orientées de façon à ce que l'axe de la caméra fasse un angle de 45° avec le plan dans lequel est située la fenêtre. On tiendra aussi compte de la position habituelle des utilisateurs du local ainsi que des directions principales de vision de ceux-ci.

En général, on ne travaille pas à partir des valeurs absolues de luminances mais plutôt par comparaison entre les différentes valeurs perçues par l'utilisateur.

3.1.2 Observations photographiques ou par caméra digitale

Souvent, on doit compléter des observations visuelles par des documents auxquels on pourra se référer plus tard, lors d'analyse ou de comparaisons.

Les photographies fournissent un enregistrement des conditions d'éclairage d'un espace intérieur. Les limitations de cette méthode proviennent de la sensibilité du film utilisé car l'œil humain est plus sensible que n'importe quel film. Afin de trouver l'éclairement le plus rapproché de l'observation visuelle, il est recommandé de prendre plusieurs photographies (avec différents temps de poses) et de sélectionner celle qui ressemble le plus à l'observation visuelle. Il est bien entendu nécessaire de documenter chaque photographie avec les informations concernant les conditions de ciel, l'orientation de la fenêtre, la hauteur du soleil et une brève description de l'option prise lors du test.

Actuellement, on utilise de plus en plus les caméras digitales qui permettent un aperçu direct de la vue et un stockage automatique des images de manière informatique.

3.2 ANALYSES QUANTITATIVES

3.2.1 Mesures d'éclairage

La mesure de l'éclairage atteint en un point précis du local est réalisée au moyen d'un luxmètre. Cet appareil se compose d'une tête de faibles dimensions qui délivre une tension électrique en fonction de la quantité de lumière reçue. Les têtes de mesures sont reliées par câble au système d'acquisition qui donne la valeur de l'éclairage mesuré. Le positionnement des luxmètres en divers endroits permet de connaître la valeur exacte de l'éclairage point par point.

3.2.2 Mesures de facteur de lumière du jour (ciel couvert CIE)

Le niveau d'éclairage naturel dans un bâtiment dépend des conditions de ciel, de la position du soleil ainsi que des caractéristiques des fenêtres et vitrages. Durant la même journée, les niveaux d'éclairage naturel peuvent varier très fortement. Les mesures d'éclairage naturel doivent donc être réalisées sous des conditions précisément définies, sinon les résultats n'ont aucune signification.

La solution courante est la mesure du facteur de lumière du jour (FLJ). Celui-ci est défini comme le rapport de l'éclairage naturel reçu en un point (généralement sur le plan de travail) sur la valeur de l'éclairage horizontal en un point situé en un site parfaitement dégagé (généralement sur le toit du bâtiment). Le type de ciel habituellement utilisé est généralement le ciel couvert CIE, dont la luminance donne une bonne approximation d'un ciel dans lequel on trouve des nuages clairs cachant le soleil. Ce ciel couvert a été standardisé par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). On peut calculer la luminance d'un point de ce ciel par la formule suivante :

$$L = L_z \frac{1 + 2 \sin \theta}{3}$$

où L_z représente la luminance du zénith et θ l'altitude du point dont on veut connaître la luminance. La luminance du zénith est donc trois fois plus élevée que celle d'un point situé à l'horizon, condition que l'on retrouve dans la pratique lorsque le soleil est couvert par un large voile de nuages gris clairs. Remarquez au passage que l'azimut d'un point n'a pas d'influence sur sa luminance, ce qui signifie que l'orientation d'une baie vitrée n'a pas d'influence sur la répartition intérieure de l'éclairage naturel, lorsqu'on se trouve en condition de ciel couvert CIE.

C'est pourquoi le facteur de lumière du jour est un indicateur qui ne permet ni l'évaluation de l'orientation, ni la prise en compte du rayonnement direct et, de plus, il est basé sur des conditions de luminance du ciel très défavorables. Il a cependant comme principal avantage le fait de fournir une quantité mesurée et standardisée, qui permet la comparaison de différents bâtiments, quelle que soit leur situation.

Pour mesurer le facteur de lumière du jour en un point, il faut donc disposer de deux cellules photoélectriques. La première sera placée à l'intérieur du local, au point pour lequel on veut la valeur du facteur de lumière du jour et la seconde sera placée horizontalement, sous le ciel, de manière à ce qu'aucune obstruction ne vienne influencer la mesure.

Si une mesure est réalisée point par point selon un maillage précis, il est possible de 'cartographier' le Facteur de lumière du jour d'un local et d'obtenir des graphiques exprimant la répartition de la lumière du jour.

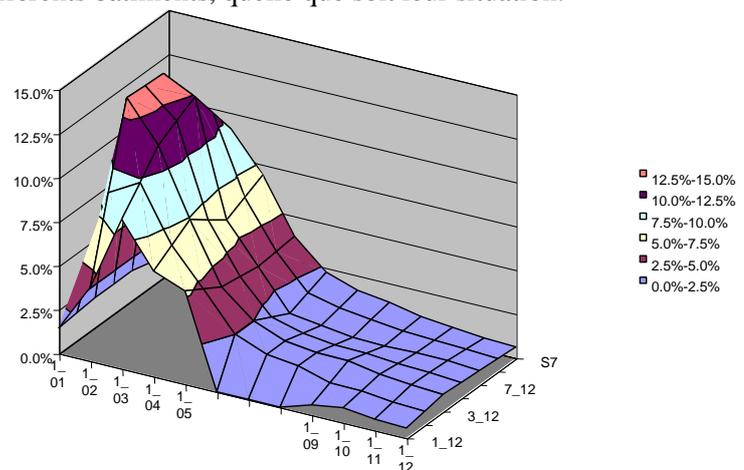


Figure 11 : Graphique cartographiant le Facteur Lumière du jour dans un local.

FLJ	- de 1%	1 à 2 %	2 à 4 %	4 à 7 %	7 à 12 %	+ de 12 %
	Très faible	Faible	Modéré	Moyen	Elevé	Très Elevé
Zone considérée	Zone éloignée des fenêtres (distance env. 3 à 4 fois la hauteur de la fenêtre)			A proximité des fenêtres ou sous des lanterneaux		
Impression de clarté	Sombre à peu éclairé		Peu éclairé à clair		Clair à très clair	
Impression visuelle du local	Cette zone semble être séparée de cette zone					
Ambiance	Le local semble être refermé sur lui-même			Le local s'ouvre vers l'extérieur		

Table 1

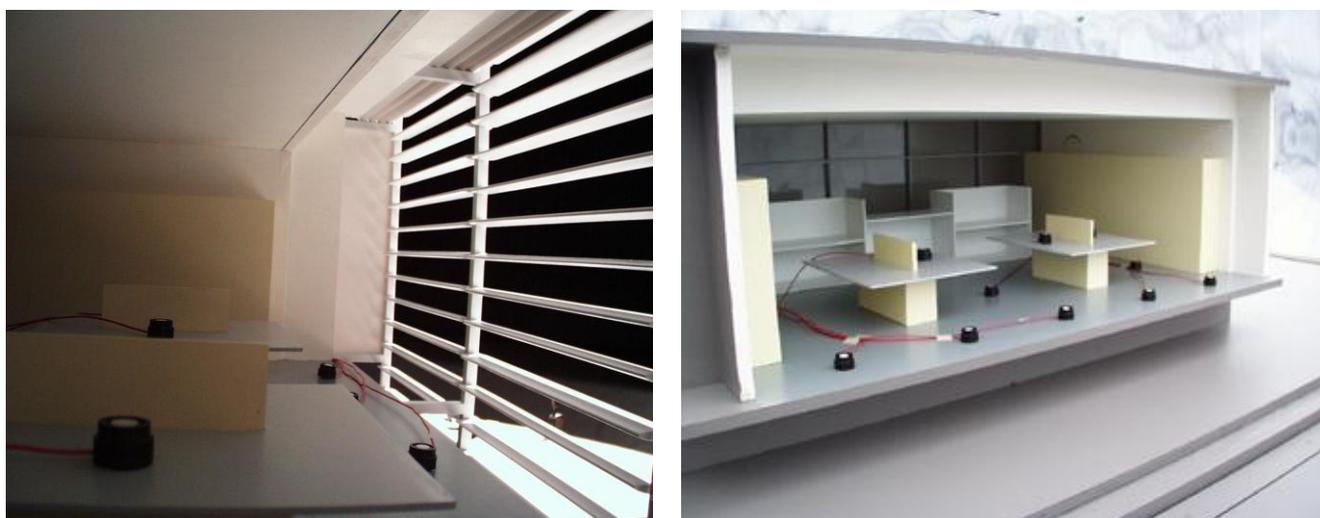


Figure 12 : Les luxmètres permettent de mesurer l'éclairement et d'en déduire le facteur de lumière du jour alors que la photo donne un aperçu général de l'ambiance lumineuse (arch21 – 2000-2001)

3.2.3 Mesures de luminance

Les mesures de luminances sont en principe réalisées par un luminancemètre. L'utilisation de ce type d'instrumentation dans un modèle réduit est très délicate car celui-ci est relativement encombrant. De plus, il faut impérativement diriger l'appareil vers le point dont on désire connaître la luminance, pour prendre une mesure.

Certaines caméras digitales permettent de réaliser, à partir de la photo qu'elles prennent, une transformation en valeurs de luminances. La caméra disponible au CSTC ne permet pas, actuellement, de réaliser ce type de calcul mais des travaux en cours ont pour objectif la prise de mesures de luminance à partir de la caméra CCD du CSTC.

4 GUIDE PRECIS A LA CONSTRUCTION DES MODELES REDUITS

4.1 L'ÉCHELLE ET LA TAILLE DES MODÈLES

Un modèle réduit peut être construit et utilisé à toutes les étapes de la conception d'un projet. Selon la phase de conception, on utilise différents types de modèle.

Généralement, il y a trois types de modèles réduits permettant de définir les performances du bâtiment :

- Des modèles de masse qui permettent d'étudier le soleil disponible en fonction du site, de la localisation du bâtiment et de son orientation.
- Des modèles permettant d'étudier les performances du bâtiment, comme, par exemple, la pénétration de lumière du jour et sa distribution, les niveaux de luminance, l'éblouissement et les contrastes.
- Des modèles étudiant précisément les ouvertures, le vitrage, le système d'ombrage, les éléments directionnels, de nouveaux matériaux, etc.

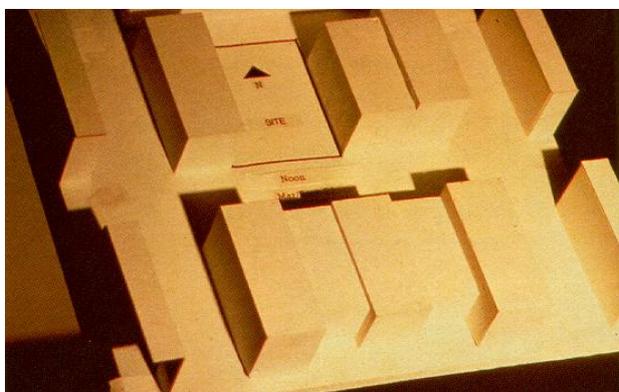


Figure 13 : Modèle de masse



Figure 14 : Modèle permettant une compréhension générale

Les échelles appropriées sont typiquement:

Echelle	Objectifs de l'étude d'éclairage
1/200 à 1/500	Pour un design préliminaire et le développement d'un concept. Pour étudier les ombres créées par le futur bâtiment ou par les bâtiments voisins.
1/200 à 1/50	Pour étudier la pénétration de la lumière directe dans un bâtiment. Pour étudier l'éclairage diffus dans un espace très grand.
1/100 à 1/10	Pour étudier les variations précises de certains composants spatiaux. Pour avoir une vue intérieure très détaillée (photos ou vidéo). Pour étudier précisément la pénétration diffuse et directe de la lumière naturelle.
1/10 à 1/1	Pour intégrer des composants industriels critiques. Pour étudier des systèmes d'éclairage naturel qui ne peuvent pas être réduits à l'échelle. Pour procéder à l'évaluation finale de systèmes d'éclairage naturel avancés par un monitoring ou une évaluation par des utilisateurs.

Table 2 [IEA 21]

Selon la taille du modèle, la précision des détails doit correspondre aux informations recherchées. Les modèles massifs peuvent être construits de manière très peu précise puisque les informations voulues sont assez générales. Pour étudier l'efficacité d'éléments de contrôle et les nouveaux matériaux, des maquettes plus précises doivent être utilisées.

La taille du modèle réduit peut également être déterminée par le type de visualisation que l'on veut réaliser ou par la taille du matériel de mesure ainsi que par la taille du ciel lui-même.

Si l'on désire prendre des photos à l'intérieur du modèle réduit, il est en effet impératif de pouvoir effectuer la mise au point de l'objectif sur l'une au moins des parois du local. On utilise en général des objectifs "macro" dont la focale est inférieure à 28 mm. Ceux-ci permettent d'obtenir une image nette à une distance très proche et offrent de surcroît un large angle d'ouverture. Cela conduit à prévoir une hauteur sous plafond d'au minimum une quinzaine de centimètres et une profondeur minimale de la pièce de l'ordre de 30 cm. Pour la majeure partie des bâtiments, cela correspond à une échelle de 1/20 ou 1/25.



Figure 15 : Caméra CCD utilisée au CSTC

Lorsqu'on utilise une caméra, il faut penser au fait que le centre de la lentille doit se trouver à la hauteur de l'œil, entre 1,5 et 1,7 m, ce qui correspond, pour une maquette à l'échelle 1/20, à des valeurs de 7,5 à 8,5 cm. Selon le diamètre de la lentille de la caméra, une échelle plus grande que 1/20 peut être requise.

Il est également important de tenir compte de la taille des cellules de mesure d'éclairement (ou luxmètres). Les cellules d'éclairement disponibles au CSTC sont au nombre de 20 et de deux sortes différentes. Il existe 15 luxmètres de marque « Hagner » et 5 luxmètres de marque « Krochmann ».

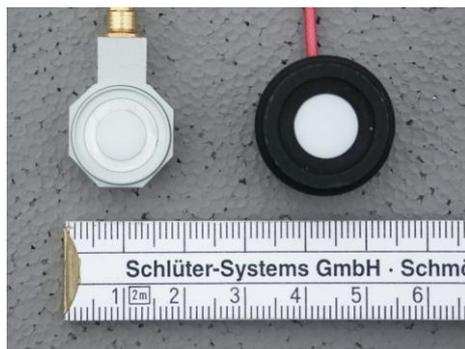


Figure 16 : Photos d'un luxmètre de marque "Krochmann"(à gauche) et d'un luxmètre de marque "Hagner" (à droite)

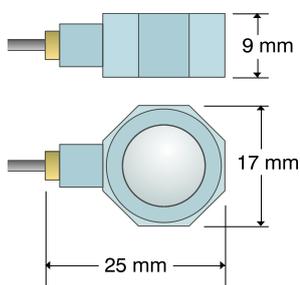


Figure 17 : Dimensions d'un luxmètre de marque "Krochmann"

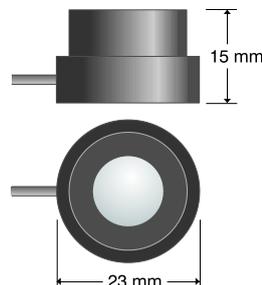


Figure 18 : Dimensions d'un luxmètre de marque "Hagner"

Les cellules d'éclairement (luxmètres) utilisées au CSTC font soit 9 mm de hauteur (Krochmann), soit 15 mm (Hagner), ce qui correspond à une hauteur de 18 cm ou 30 cm pour un modèle réalisé à l'échelle 1/20. En principe, le plan de travail se trouve à environ 80 cm au-dessus du sol (taille réelle). Si l'on veut

mesurer l'éclairement au niveau du plan de travail, il peut donc s'avérer nécessaire de surélever quelque peu les cellules.

Pour des raisons relatives aux dimensions des 2 types de ciels artificiels, les tailles des modèles sont limitées.

Pour la **Mirror Box**, la dimensions des modèles sont limités à 1,1 mètre en longueur et en largeur. La hauteur maximale des modèles est, quant à elle, limitée à 70 cm, cela pour des raisons d'uniformité de distribution de luminance du ciel. Le socle de la maquette ne pourra avoir une épaisseur supérieure à trois centimètres et ne pourra avoir de dimensions excédant 1m25 sur 1m25. Les cas particuliers nécessitant une modélisation complète des alentours (base plus large, bâtiments causant un effet d'ombrage,...) feront l'objet de discussions particulières avec le CSTC avant toute modélisation

En ce qui concerne le **ciel artificiel à une lampe**, la base des modèles doit absolument s'inscrire dans un cercle de diamètre inférieur à 1,4 m. La hauteur est, quant à elle, limitée à 1 mètre. Une remarque importante est faire au niveau du socle de la maquette : pour des raisons de fixations, il faut impérativement qu'il soit construit en dur (socle en bois), qu'il dépasse de 3 centimètres au moins des parois du modèle et qu'il ait une hauteur maximale de 3 cm (cfr Figure 19)

De plus, la maquette devant être présentée selon différents angles, elle sera inclinée d'environ 60° par rapport à l'horizontale (cfr Figure 20). Il faut donc que tous les éléments (mobilier, parois...) soient convenablement fixés au modèle. Le poids total de la maquette sera limité à 15 kilos pour, d'une part permettre à la table d'effectuer ses mouvements de rotation et, pour d'autre part, ne pas gêner la manutention.



Figure 19 : Système de fixation du modèle sur la table

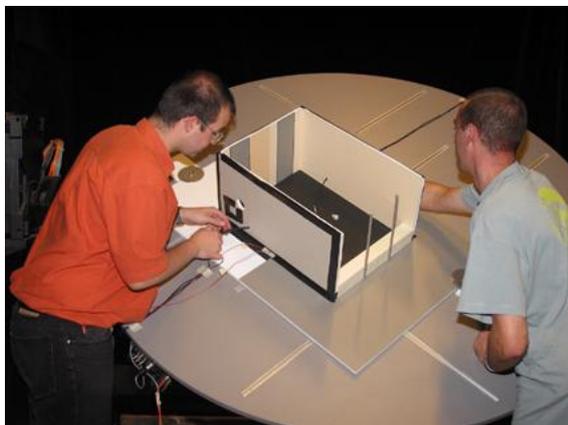


Figure 20 : Fixation du modèle et des capteurs

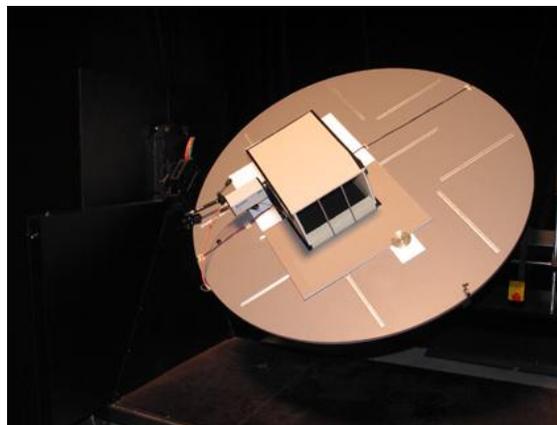


Figure 21: Rotation de la table et du modèle

Si l'on désire tester le modèle sous les **deux types de ciel**, il faudra impérativement s'aligner sur les prescriptions les plus contraignantes à savoir :

- 1 m x 1 m x 0.7 m comme limite pour le modèle (L x l x h)
- 1,1 m x 1,1 m x 0.03 m comme limite pour le socle (L x l x h)
- 15 kg comme poids limite

4.2 GÉOMÉTRIE DU MODÈLE ET MODÉLISATION DES PAROIS.

Toutes les parois doivent être présentes dans le modèle. Pour simuler de grands buildings symétriques, on peut se limiter à la construction d'une moitié en utilisant un miroir pour simuler la seconde partie du bâtiment. **Cependant, cette technique n'est applicable que sous des conditions de ciel couvert** et peut être à la base d'erreurs substantielles quand le rayonnement direct du soleil entre dans le bâtiment. La géométrie des espaces et des bâtiments doit être reproduite très prudemment.

Le miroir doit être fixé à la maquette sans créer de fuites de lumière. Les parois verticales et horizontales qui touchent ce miroir doivent donc être parfaitement alignées ! Il convient également de placer du collant noir tout le long des intersections entre le miroir et la maquette. Dans le cas contraire, la lumière passe par la fente créée le long du miroir et subit de multiples réflexions sur celui-ci. Ces réflexions seront à la base d'un apport de lumière qui n'existe pas dans la réalité. C'est pourquoi les modèles ainsi réalisés ne peuvent être testés que dans la Mirror Box et qu'il est souvent préférable de construire tout le volume.



Figure 22 : Système de miroirs inclus dans le modèle.

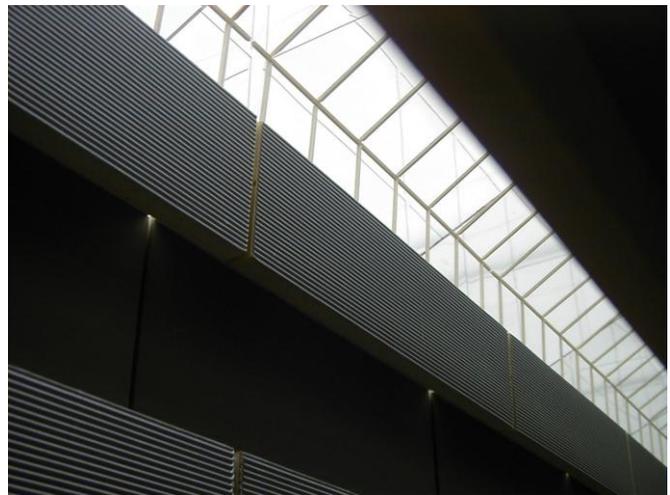


Figure 23 : Résultat de la modélisation intérieure obtenue par l'introduction d'un miroir

Les cloisons internes ont beaucoup d'influence sur la répartition et la quantité de lumière dans la pièce. Il est essentiel de les modéliser. Le mobilier peut, lui aussi influencer la lumière. L'importance de cette influence dépendra de la manière dont le mobilier sera disposé ainsi que de sa couleur. La modélisation du mobilier demande plus d'effort que la modélisation des cloisons et n'est pas obligatoire, du moins lors des premières études. Lors de la phase finale de l'étude, il peut être intéressant de modéliser et de placer le mobilier dans la maquette, afin de visualiser la solution finale.



Figure 24 : Modélisation d'un même local avec et sans meubles



Figure 25 : La prise en compte du mobilier permet une vision très réaliste des espaces (arch 21 - 2001-2002)

4.3 DISPOSITION DU MATÉRIEL DE MESURE

Attention ! Les consignes données dans ce paragraphe doivent être impérativement respectées de manière à ce que les mesures soient les plus précises et rapides possibles.

- On doit pouvoir accéder à l'intérieur du modèle pour placer les luxmètres. S'il n'y a pas d'ouverture (fenêtres) permettant le passage des sondes à proximité des points de mesure, il convient de prévoir la possibilité d'enlever et de remettre facilement et rapidement une des parois du modèle. Il est également utile de prévoir un petit trou permettant le passage des fils au travers d'une des parois verticales. Ce trou fera environ 1 cm². Il faudra également veiller à ce que les fils des luxmètres ne passent pas au travers d'une ouverture qui devra être enlevée au cours des essais, sinon, il faudra alors décoller les luxmètres à chaque fois, ce qui prend du temps et pose des problèmes de précision par rapport à la position de ceux-ci.



Figure 26 : Luxmètres installés dans un modèle et ouvertures dans les parois

- La maquette peut être conçue de manière à ce qu'une des parois soit facilement amovible. Il peut s'agir de la façade ou du plafond, cela, pour placer plus facilement les capteurs.
- On doit aussi prévoir des ouvertures qui permettront de placer la caméra (57 mm de diamètre), et/ou de réaliser une observation visuelle. **Tous les trous qui sont réalisés dans ce but doivent pouvoir être obstrués au moment où les mesures sont réalisées.** Attention, il faut prévoir un trou de 50 mm de diamètre, parfaitement circulaire, de manière à faire entrer facilement l'objectif de la caméra dans la maquette.

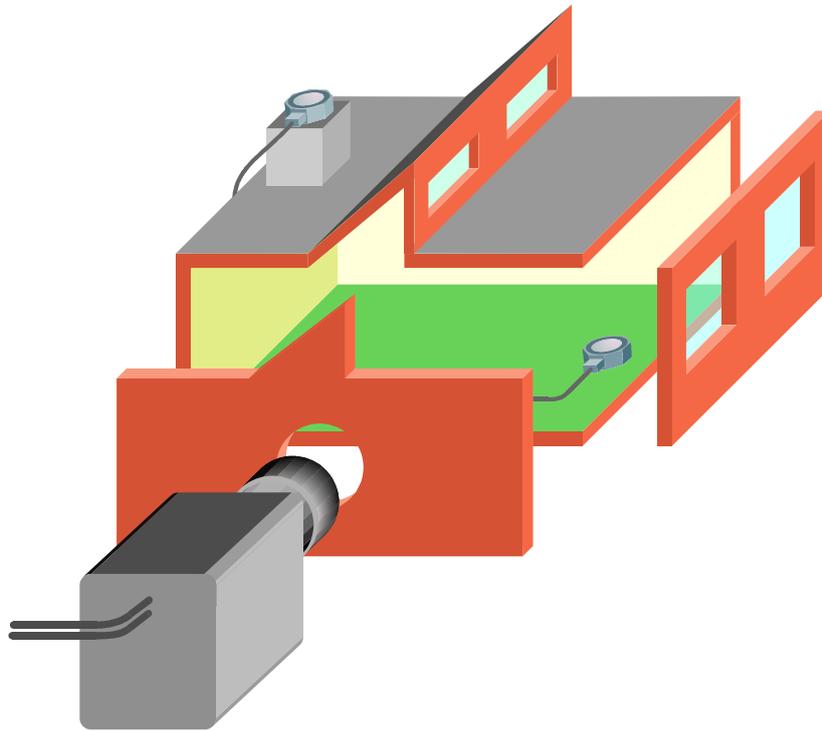


Figure 27 : Schéma général d'assemblage d'un modèle

- Il est intéressant de déterminer les points de mesure lors de la construction de la maquette et de les marquer, par exemple au moyen de punaises ou d'aiguille, de manière à pouvoir centrer facilement les capteurs. Pour des bâtiments tels que des galeries d'art, des musées, etc., il convient de mesurer l'éclairage sur les murs. Dans ce cas, le mieux est de faire un trou dans la paroi considérée, de manière à y placer le capteur d'éclairage. Le haut du capteur devra donc être aligné avec le mur (l'épaisseur du capteur est de 9 mm – prévoir aussi le passage du fil). Ces trous doivent pouvoir être obstrués quand ils ne sont pas employés.



Figure 28 :
Luxmètres dans le
modèle réduit

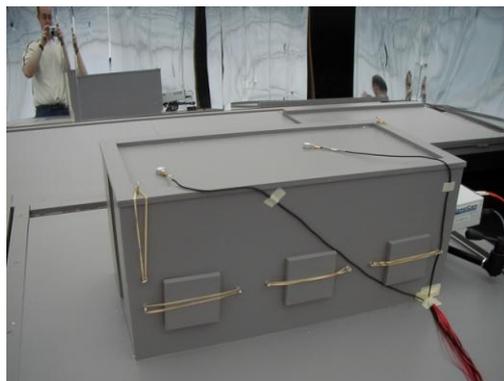


Figure 29 : Vue extérieure du modèle
réduit – 3 ouvertures latérales
permettant la prise de vue –
obstruction variable

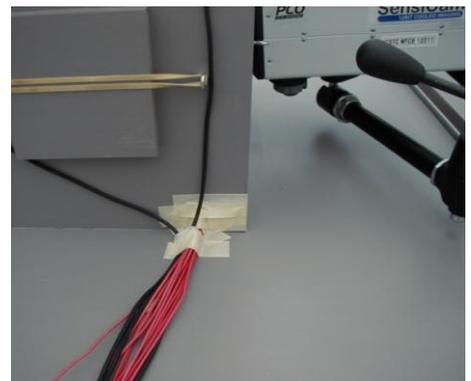


Figure 30 : Arrivée du câblage dans
le modèle réduit

4.4 COULEURS ET COEFFICIENTS DE RÉFLEXION DES PAROIS

Les coefficients de réflexion des matériaux doivent correspondre précisément à ceux des matériaux réels. Supposons que les parois intérieures du local à représenter soient de couleur claire ($\rho=50\%$) et que les parois du modèle réduit soient blanches ($\rho=85\%$). Les mesures réalisées sur le modèle réduit pourront surévaluer le facteur de lumière du jour moyen de 150 à 200 %. Cela provient du fait que le facteur de lumière du jour sur le plan de travail est inversement proportionnel à $(1-\rho)^2$. Même si le local a des parois de couleur blanche, la poussière, la saleté et la texture de la surface peuvent réduire le facteur de réflexion moyen jusqu'à une valeur de 70 %. Dans ce dernier cas, la sur-estimation du facteur de lumière du jour moyen serait de 80 à 100 %. Il faut également modéliser avec prudence les surfaces réfléchissantes comme les miroirs : l'effet de la poussière sur ceux-ci (particulièrement dans le cas de light-shelves) peut être important.

Le choix du matériau à utiliser dépendra du fait que l'analyse photographique se fait au moyen de photos couleurs ou noir et blanc. Pour des photographies couleur, les surfaces doivent être de même couleur que les surfaces réelles alors que si l'analyse est réalisée au moyen de photos noir et blanc, seul le coefficient de réflexion des parois devra correspondre à celui de la paroi réelle. L'annexe 1 donne des valeurs de quelques matériaux couramment repris dans les maquettes ainsi que de cartons de la marque « Canson » dont les coefficients de réflexion coïncident avec ceux de ces parois. Attention, ce tableau n'est valable qu'au niveau des coefficients de réflexion et non au niveau des couleurs.

Pour effectuer un choix correct au niveau du revêtement des parois intérieures et pour obtenir le coefficient de réflexion le plus proche sans effectuer d'analyse comparative trop lourde via colorimètre ou spectrométrie, il 'suffit' de prendre un carton dont la couleur est la plus proche possible du matériau à modéliser. Lorsque le choix est effectué avec soin, le coefficient de réflexion du carton retenu est généralement assez proche de la réalité.

4.5 TYPE DE MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DES PAROIS ET RACCORDEMENT DE CES PAROIS ENTRE ELLES

Toutes les parois du modèle doivent être raccordées très précisément afin d'éviter toute pénétration parasite de lumière. La Figure 27 montre une maquette réalisée à l'aide de carton mousse (1 cm d'épaisseur au minimum). Ce matériau présente l'avantage de se découper facilement et permet de créer des chicanes dans les angles, en jouant sur les différentes couches dont il est constitué (voir Figure 31). L'assemblage des divers éléments et parois permet d'éviter les moyens de fixation irréversibles, tels que la colle pour les endroits que l'on veut pouvoir modifier. La pratique montre que l'utilisation d'épingles offre une grande souplesse pour les modifications.

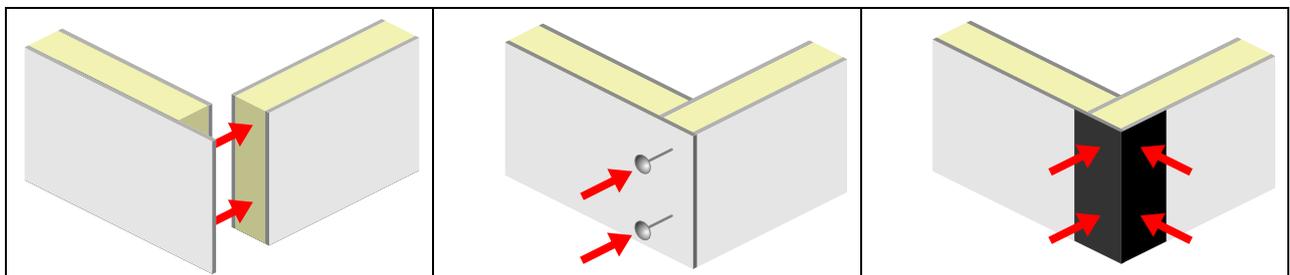


Figure 31 : Fixation de la paroi amovible en carton mousse

Pour la construction de modèles réduits, on peut employer presque tout matériau utilisé habituellement en architecture pour élaborer une maquette. Le carton-mousse, qui est un matériau offrant plusieurs avantages lors de la création d'une maquette d'éclairage a comme inconvénient une légère transparence à la lumière. Pour limiter au maximum ce phénomène, on utilisera un carton mousse d'au minimum 1 cm d'épaisseur.

Le balsat n'est pas étanche à la lumière et ne peut donc pas être utilisé pour des études d'éclairage naturel. Il peut cependant être utilisé comme revêtement et être collé aux parois.

Il existe plusieurs méthodes permettant de mesurer la transmissivité des parois opaques. Généralement, on constate plutôt approximativement s'il y a une transmissivité ou pas... Pour cela, il suffit de placer le modèle réduit en plein soleil et de vérifier qu'aucune lumière n'est visible au travers des parois sensées être opaques. Si la lumière est visible à travers ces parois, celles-ci doivent alors être peintes en noir. Une manière plus précise est de mesurer la luminance dans la pièce, les ouvertures étant obstruées. Toute la lumière pénétrant dans la maquette est alors due aux défauts d'opacité des parois ou à des défauts dans les liaisons entre parois. La dernière méthode pour vérifier l'étanchéité à la lumière de la maquette est de se placer dans un local obscur et de placer une source lumineuse à l'intérieur du modèle.

Les deux types de défauts présentés ici (fuite de lumière au raccord ou mauvaise opacité des parois) peuvent conduire à des erreurs de mesures non négligeables dans le cas de pièces à faibles facteurs de lumière du jour. La Figure 32 montre une maquette dont les parois sont mal raccordées.

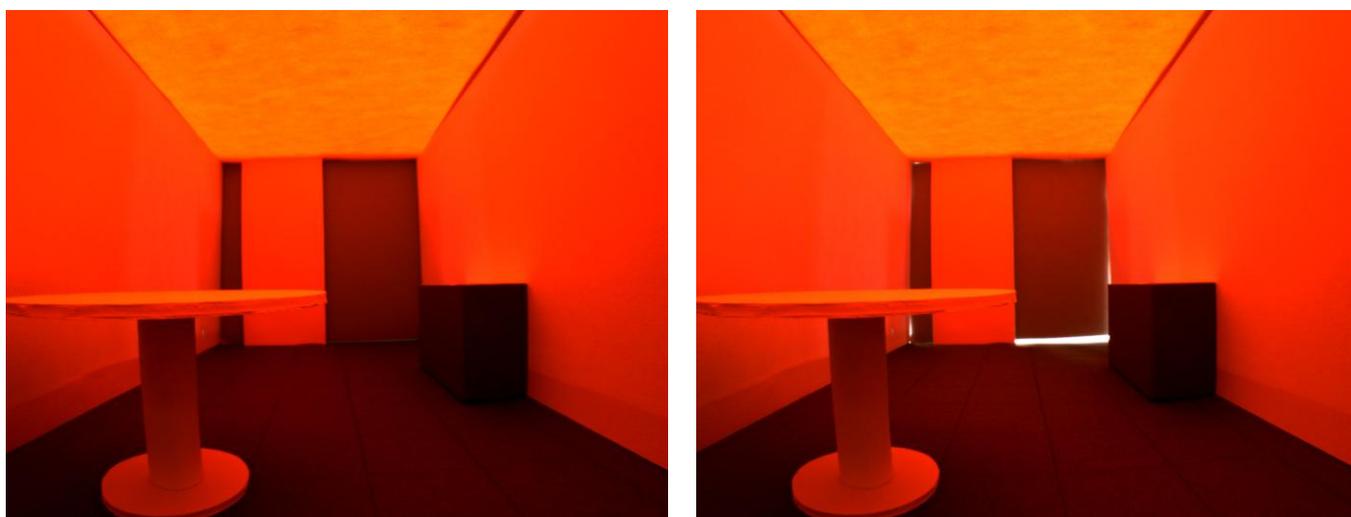


Figure 32 : Vue dans un local dont les parois sont bien raccordées entre-elles (gauche) et dont les parois sont mal raccordées entre-elles (droite).

4.6 MODÉLISATION DU SOL EXTÉRIEUR ET DES LOCAUX QUI NE SONT PAS SITUÉS AU REZ-DE-CHAUSSÉE

Dans certains cas (fenêtre basse, sol très réfléchissant, ...), la proportion de lumière naturelle réfléchi sur le sol extérieur et pénétrant ensuite dans le local est importante.

Il convient donc de modéliser avec soin le sol extérieur, sauf si le projet ne comporte que des fenêtres de toiture. Actuellement, le sol de la mirror box est de couleur grise et son coefficient de réflexion de 20 %.

4.7 MODÉLISATION DES OBSTRUCTIONS EXTÉRIEURES

Les obstructions extérieures (bâtiments voisins, végétation) doivent être modélisées précisément, autant en ce qui concerne leur taille que leur coefficient de réflexion. Les coefficients de réflexion des parois extérieures du bâtiment testé ont quant à eux, nettement moins d'influence sur l'éclairage interne des locaux. Les obstructions qui seront modélisées sont celles qui seront placées à maximum 40 à 50 cm des parois de la mirror box.

4.8 MODÉLISATION DES OUVERTURES

Les détails constructifs des fenêtres (épaisseur de la fenêtre, appuis de fenêtres, lightshelves) doivent être modélisés précisément car ils affectent la distribution de la lumière dans la pièce. Les vitrages étant difficile à modéliser, il vaut souvent mieux les omettre du modèle et appliquer un coefficient de correction, sauf pour des cas particuliers (vitrages diffusants ou prismatiques).

Cependant, si la principale source de lumière pénètre dans la pièce avec un angle d'incidence de plus de 60° , il faudra alors inclure le vitrage dans le modèle réduit afin de tenir compte de la partie de la lumière qui est réfléchi par celui-ci.

La taille de l'ouverture doit correspondre à la taille de la surface vitrée (et pas de la fenêtre entière), à moins que l'on ne modélise précisément les châssis.

4.9 ADAPTABILITÉ DU MODÈLE

Selon les informations voulues, le modèle doit être adaptable. En effet, si le but de l'étude est d'étudier l'influence des coefficients de réflexion des parois sur l'éclairage intérieur, il peut être utile de prévoir plusieurs feuilles de papier ou de carton que l'on viendra glisser dans le modèle, sur les parois. On peut aussi prévoir des parois opaques de différentes teintes, à condition que le changement de parois soit rapide et facile à faire.

Si on veut étudier l'influence de la taille d'une fenêtre de façade, il faut prévoir plusieurs parois modélisant la façade, dans lesquelles les ouvertures sont prévues à l'avance. On peut aussi partir de la façade la plus ouverte et prévoir des morceaux de carton que l'on viendra emboîter dans celle-ci, afin de modéliser les ouvertures les plus petites.

Lorsqu'on doit enlever et remettre une ou plusieurs parois au cours d'un essai, il faut prévoir l'entrée des luxmètres et le passage des fils par une autre paroi (fixe), de manière à ne pas devoir déplacer les luxmètres lors de chaque changement de façade.

5 ANNEXES

5.1 ANNEXE A :PRISES DE VUES - ILLUSTRATIONS



Figure 33 : Fabrication d'un modèle réduit

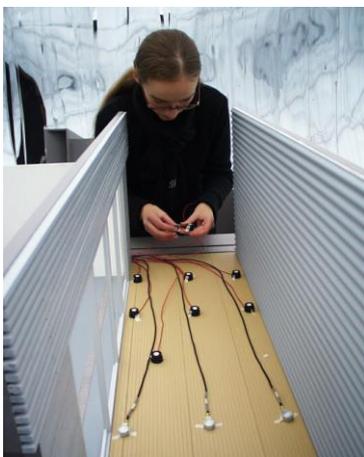


Figure 34 : Installation de luxmètres sur le modèle réduit

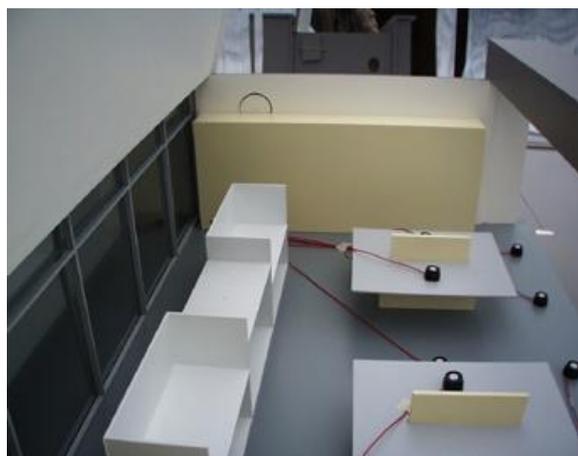
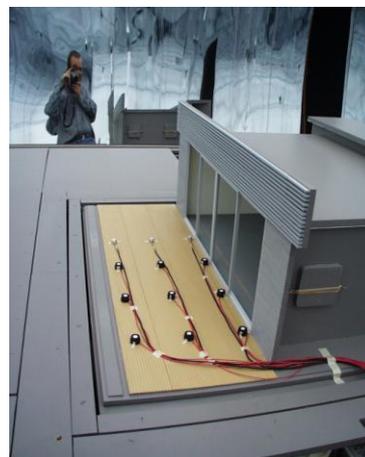


Figure 35 : Disposition de capteurs



Figure 36 : Etudiants (3ème Ir Cv Arch – UCL) travaillant dans la Mirror Box

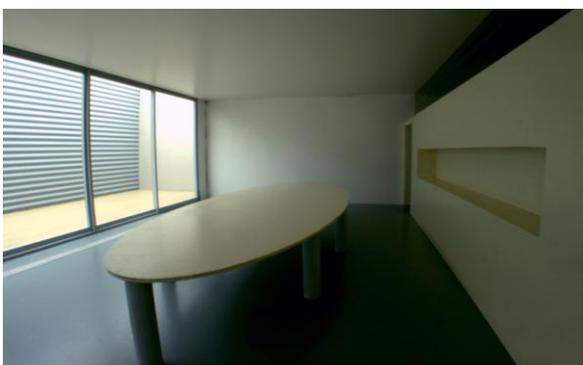


Figure 37 : Modèle réduit – vue intérieure

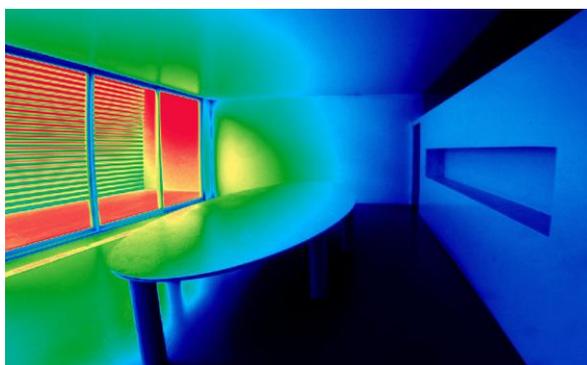


Figure 38 : Distribution des luminances (0 à 3000 cd/m²)

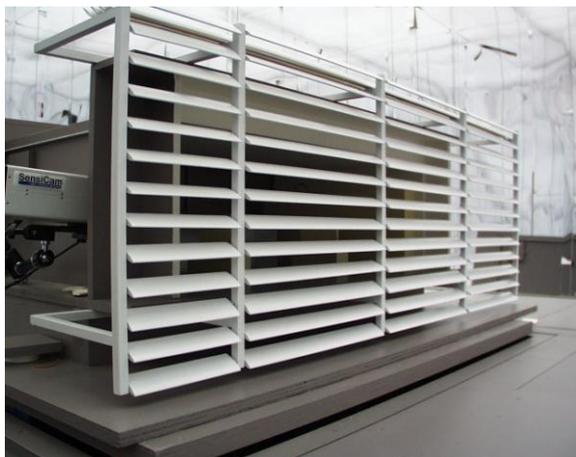


Figure 39 : Modèle réduit – modélisation de protections solaires mobiles



Figure 40 : Système de protections solaires mobiles – vue intérieure

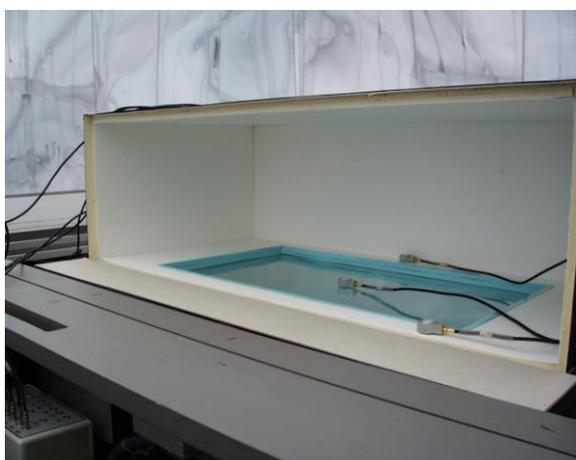


Figure 41 : Modèle réduit – modélisation d'une piscine

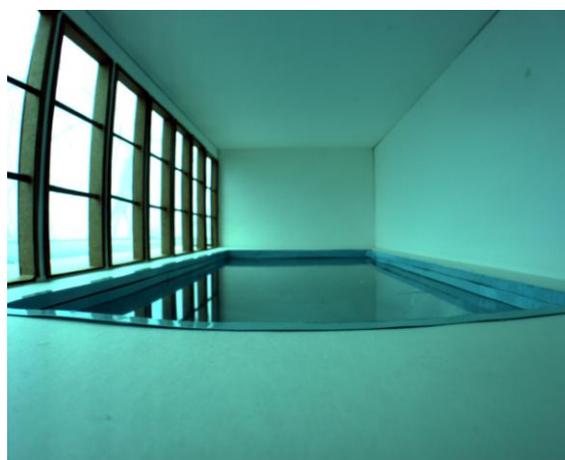


Figure 42 : Modèle réduit – modélisation d'une piscine – vue intérieure



Figure 43 : Modèle réduit – modélisation d'un appartement



Figure 44 : Modèle réduit – modélisation d'un magasin

5.2 ANNEXE B : COEFFICIENTS DE RÉFLEXION DE CERTAINS MATÉRIAUX ET CARTONS DONT LES COEFFICIENTS DE RÉFLEXION SE RAPPROCHE LE PLUS DE CEUX-CI

La Table 3 donne, pour certains matériaux constitutifs d'une maquette ainsi que le mobilier, des cartons dont le coefficient de réflexion se rapproche de celui de ces matériaux. Attention, la correspondance n'est réaliste qu'au niveau des coefficients de réflexion et n'est utilisable qu'en cas d'analyse en noir et blanc. Une analyse couleur ne sera l'image de la réalité que si les couleurs des matériaux et les coefficients de réflexion sont respectés.

Il s'agit d'un exemple typique du choix des matériaux pour la modélisation d'un local.

Type de surface	Couleur surface	Y Coeff réflexion (%)	Carton correspondant		Couleur carton
			Marque Canson	Y Coeff réflexion (%)	
Table	beige clair	76.33	Mi teinte 100	75.45	Vert clair
Tapis	vert-gris	13.46	Mi teinte 448	11.53	Vert
Mur - paroi	beige clair	67.68	Mi teinte 104	67.83	mauve clair
Tablette dessus armoire	beige clair	75.52	Mi teinte 100	75.45	vert clair
Paroi armoire	noir	7.97	Mi teinte 503	8.73	bordeau
Porte avant armoire	noir	8.74	Mi teinte 503	8.73	bordeau
Porte 1	brun clair	51.27	Mi teinte 470	56.92	ocre
Porte 1 bis	brun clair	51.85	Mi teinte 470	56.92	ocre
Châssis porte int 1	gris peinture	28.34	Mi teinte 431	25.59	gris
Châssis porte int 1 bis	gris peinture	28.24	Mi teinte 431	25.59	gris
Tablette sous fenêtre	gris peinture	28.76	Mi teinte 431	25.59	gris
Mur sous fenêtre	blanc	68.03	Mi teinte 407	68.17	beige
Plinthe sous fenêtre	brun clair	38.16	Mi teinte 354	38.79	gris
Mur sous fenêtre latérale	gris peinture	27.28	Mi teinte 431	25.59	gris
Tissus fauteuil	vert	11.61	Mi teinte 448	11.53	vert
Plafond troué 1	beige	60.71	Mi teinte 400	60.06	jaune
Plafond troué 1 bis	beige	60.56	Mi teinte 400	60.06	jaune
Socle porte manteau	noir	6.00	Mi teinte 425	3.89	noir
Feuille présentoir	blanc	78.63	Mi teinte 101	79.46	jaune clair
Feuille porte	blanc	67.26	Mi teinte 104	67.83	Mauve clair
Latte horizontale plafond	beige	76.36	Mi teinte 100	75.45	Vert clair
Bois du plateau	brun foncé	13.38	Mi teinte 448	11.53	Vert

Table 3

5.3 ANNEXE C : MESURES COLORIMETRIQUES DE CARTONS (Y = COEFFICIENT DE REFLEXION)

Marque	Type	Référence	Y Coeff réflexion	x	y	Couleur
Canson	Mi-teintes	132	21.36	0.3716	0.3519	Brun
Canson	Mi-teintes	133	13.24	0.3449	0.3307	Brun
Canson	Mi-teintes	130	17.52	0.4376	0.3311	Rouge/brun
Canson	Mi-teintes	150	15.9	0.2453	0.2193	Bleu
Canson	Mi-teintes	131	15.19	0.3041	0.2889	Aubergine
Canson	Mi-teintes	140	5.88	0.268	0.2555	Bleu
Canson	Mi-teintes	101	79.46	0.3413	0.3543	Jaune clair
Canson	Mi-teintes	100	75.45	0.3268	0.3557	Vert clair
Canson	Mi-teintes	102	72.46	0.2978	0.3108	Bleu clair
Canson	Mi-teintes	104	67.83	0.3042	0.3022	Mauve clair
Canson	Mi-teintes	103	74.69	0.3366	0.3281	Rose clair
Canson	Mi-teintes	110	78.37	0.3288	0.3366	Beige
Canson	Mi-teintes	111	74.88	0.3373	0.3421	Beige
Canson	Mi-teintes	112	64.07	0.3371	0.339	Beige
Canson	Mi-teintes	407	68.17	0.3462	0.3496	Beige
Canson	Mi-teintes	350	62.35	0.3614	0.3533	Pêche
Canson	Mi-teintes	340	46.6	0.3597	0.3537	Ocre
Canson	Mi-teintes	470	56.92	0.373	0.3071	Ocre
Canson	Mi-teintes	374	44.67	0.394	0.3739	Orange
Canson	Mi-teintes	384	34.99	0.4184	0.3751	Orange
Canson	Mi-teintes	504	25.11	0.4316	0.3666	Brun
Canson	Mi-teintes	502	17.87	0.4096	0.3804	Brun
Canson	Mi-teintes	400	60.06	0.4375	0.428	Jaune
Canson	Mi-teintes	553	39.2	0.5103	0.4143	Orange
Canson	Mi-teintes	453	26.08	0.5154	0.372	Orange
Canson	Mi-teintes	506	16.52	0.5261	0.3256	Rouge
Canson	Mi-teintes	505	15.21	0.4862	0.3012	Rouge
Canson	Mi-teintes	507	16.44	0.3571	0.2471	Violet
Canson	Mi-teintes	595	20.46	0.1945	0.2197	Bleu
Canson	Mi-teintes	575	16.93	0.2596	0.3829	Vert
Canson	Mi-teintes	352	40.75	0.3598	0.3176	Rose
Canson	Mi-teintes	480	32.86	0.335	0.3757	Vert
Canson	Mi-teintes	490	25.48	0.2773	0.2896	Bleu
Canson	Mi-teintes	475	24.6	0.3222	0.396	Vert
Canson	Mi-teintes	495	15.56	0.2518	0.251	Bleu
Canson	Mi-teintes	343	40.41	0.3313	0.3374	Gris
Canson	Mi-teintes	426	37.5	0.3325	0.3296	Gris
Canson	Mi-teintes	354	38.79	0.3069	0.3195	Gris
Canson	Mi-teintes	431	25.59	0.318	0.3272	Gris
Canson	Mi-teintes	429	23.35	0.3314	0.3378	Gris
Canson	Mi-teintes	336	22.1	0.3511	0.357	Vert
Canson	Mi-teintes	590	10.1	0.2269	0.2025	Bleu
Canson	Mi-teintes	500	10.53	0.2705	0.2711	Bleu
Canson	Mi-teintes	448	11.53	0.3168	0.3458	Vert
Canson	Mi-teintes	501	10.27	0.3616	0.3467	Brun

Canson	Mi-teintes	503	8.73	0.3605	0.3137	Bordeau
Canson	Mi-teintes	335	83.73	0.3149	0.3221	Blanc
Canson	Mi-teintes	120	63.72	0.3173	0.3212	Blanc
Canson	Mi-teintes	122	34.12	0.3189	0.3233	Gris
Canson	Mi-teintes	345	11.69	0.3277	0.3249	Gris
Canson	Mi-teintes	425	3.89	0.3072	0.3126	Noir
Canson	Ingres Vidalon	1	80.19	0.3192	0.3235	Blanc
Canson	Ingres Vidalon	48	65.96	0.3495	0.35	Beige
Canson	Ingres Vidalon	36	60.48	0.3661	0.3551	Beige
Canson	Ingres Vidalon	62	57.33	0.3707	0.3662	Beige
Canson	Ingres Vidalon	31	43.67	0.3618	0.3528	Beige
Canson	Ingres Vidalon	42	44.25	0.3956	0.3762	Ocre
Canson	Ingres Vidalon	80	25.44	0.4342	0.3698	Ocre
Canson	Ingres Vidalon	74	9.48	0.3673	0.3502	Brun
Canson	Ingres Vidalon	78	8.97	0.3588	0.3151	Aubergine
Canson	Ingres Vidalon	82	15.07	0.487	0.299	Rouge
Canson	Ingres Vidalon	37	38.55	0.3644	0.3155	Rose
Canson	Ingres Vidalon	46	58.64	0.4276	0.4324	Jaune
Canson	Ingres Vidalon	66	31.74	0.3364	0.3756	Vert
Canson	Ingres Vidalon	58	11.49	0.3196	0.3504	Vert
Canson	Ingres Vidalon	68	23.49	0.2764	0.2876	Bleu
Canson	Ingres Vidalon	71	10.09	0.2718	0.2727	Bleu
Canson	Ingres Vidalon	33	38.09	0.3321	0.3361	Gris
Canson	Ingres Vidalon	52	37.46	0.3312	0.3297	Gris
Canson	Ingres Vidalon	39	34.9	0.3024	0.3171	Gris/Bleu
Canson	Ingres Vidalon	55	26.07	0.3166	0.3246	Gris
Canson	Ingres Vidalon	50	3.82	0.3075	0.313	Noir

Table 4

5.4 ANNEXE D : TABLEAU DONNANT LES VALEURS MOYENNES RECOMMANDEES ET LES VALEURS MINIMALES DE FACTEURS DE LUMIERE DU JOUR EN FONCTION DU TYPE DE BATIMENT ET DE L'ACTIVITE.

Type de bâtiment	Activité	FLJ moyen (%)	FLJ minimum (%)	Endroit de mesure
Aéroport et station de bus	Zone de réception	2	0.6	Bureaux
	Douane et zone d'immigration	2	0.6	Comptoirs et bureaux
	Zones de circulation, salons	2	0.6	Plan de travail
Salles de concert et de séminaires	Foyer, auditoire	1	0.6	Plan de travail
	Couloir	2	0.6	Sol
	Escaliers	2	0.6	?
Banques	Comptoirs, comptabilité, dactylographie	5	2	Bureaux
	Zones de lecture Zones publiques	2	0.6	Plan de travail
Eglises	Corps de l'église	5	1	Plan de travail
	Chaire, cœur	5	1.5	Bureau
	Autel	5	2	Table
Bureaux de dessin	Général	5	2.5	Sur les tables
L'intérieur des bâtiments en général	Hall d'entrée et zones de réception	2	0.6	Plan de travail
Hôpitaux	Réceptions et salles d'attente	2	0.6	Plan de travail
	Salles de consultation	5	1	Hauteur du chevet
	Pharmacies	5	3	Plan de travail
	Salles de lecture	5	1.5	Tables
Bibliothèques	Etagères (rayonnages)	5	1.5	Plan vertical
Musées et galeries d'art	Général	5	1	Plan de travail
Bureaux généraux	Equipement de bureautique, contrôlé manuellement	5	2	Clavier de contrôle
	Ordinateurs	5	2.5	Clavier
Ecoles	Salles de réunion	1	0.3	Plan de travail
	Salles de classe	5	2	Bureaux
	Salles de cours d'art	5	2	Chevalets
	Laboratoires	5	2	Plan de travail
	Salles des professeurs, locaux communs	5	1.5	Plan de travail
Halls de sport	Général	5	3.5	Plan de travail
Chirurgie (médicale et dentaire)	Salles d'attente	2	0.6	Plan de travail
	Salles d'opération	5	2.5	Plan de travail
	Laboratoires	5	2	Plan de travail
Piscines	Piscine	5	2	Surface de l'eau
	Espaces environnants	1	0.5	Plan de travail
Habitations	Salon et pièces à multiples activités	1.5	0.5	
	Chambres à coucher	1	0.3	
	Cuisine	2	0.6	

Table 5

5.5 ANNEXE E : MODELISATION DE LA VOUTE CELESTE A PARTIR DE LA REPARTITION DE TREGENZA

Lorsqu'on désire modéliser des conditions de ciel artificiel proches de celles rencontrées sous ciel naturel, il est nécessaire de reproduire les distributions de luminances de ce ciel artificiel de la manière la plus précise possible. Tregenza a montré [Tre 1987] que l'on peut modéliser la voûte céleste au moyen de 145 zones modélisant chacune une partie du ciel. Cette division du ciel est représentée aux Figure 45 et Figure 46.

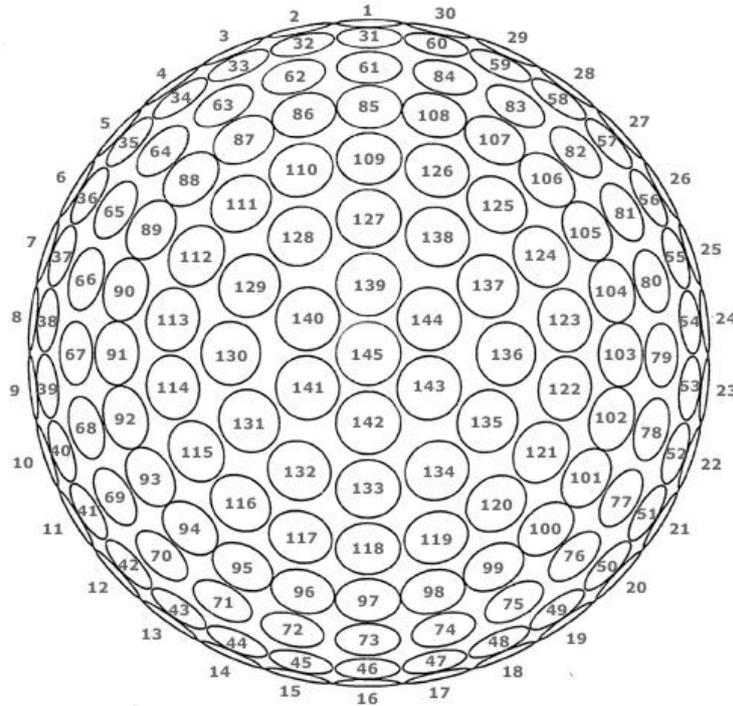


Figure 45

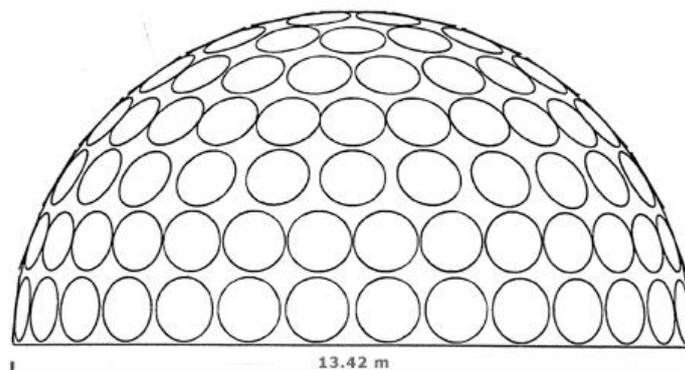


Figure 46

Dans le cas du ciel construit au CSTC, la voûte céleste a été modélisée à partir d'une seule zone (un seul disque), constituée elle-même de 91 spots halogènes. Cela nous permet de pouvoir modéliser un nombre illimité de types de ciels, d'éviter les difficultés de calibration ainsi que le vieillissement différencié des sources ponctuelles. Les problèmes de maintenance sont également réduits par rapport à un ciel qui serait modélisé en entier ou même par rapport à un secteur de dôme.

6 BIBLIOGRAPHIE

-
- [DH 2001] De Herde A., Reiter S., "L'éclairage naturel des bâtiments", Ministère de la Région Wallonne, 2001.
-
- [Lyn 1988] Lyne J.A., "Alternative subdivision for the sky vault", *Lighting Research Technology* 20(1), p33-37, 1988.
-
- [IEA 21] "Daylight in buildings, a source book on daylighting systems and components"
-
- [Tre 1987] Tregenza P.R. "Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements", *Lighting Research and Technology* 19, p.13-14, 1987.
-
- "Maquettebouw", Norbert De Waele, Hoger Architectuurinstituut Sint-Lucas Gent/Brussel
-
- CIBSE, « Window design », Applications manual, The Chartered Institution of Building Services Engineers, London, 1987.
-

Centre Scientifique et Technique de la Construction

Division Physique du Bâtiment et Climat intérieur

Avenue Pierre Holoffe 21

B-1342 Limelette

Belgique

Tel : +32 2 655 77 11

Fax : +33 2 653 07 29

Website : www.bbri.be