



HAL
open science

Confort visuel: Amélioration des formules de FLJ

Michel Perraudau

► **To cite this version:**

Michel Perraudau. Confort visuel: Amélioration des formules de FLJ. Rapport technique EN-DSC/ECE 14.30, CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment, France. 2015. hal-04854507

HAL Id: hal-04854507

<https://cstb.hal.science/hal-04854507v1>

Submitted on 23 Dec 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Projet R&D Confort des espaces de vie

Sous-tâche 2.3 : Confort visuel Amélioration des formules de FLJ

Rapport d'avancement

PERRAUDEAU Michel

janvier 2015

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT

SIÈGE SOCIAL > 84 AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2

TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX. (33) 01 60 05 70 37 | SIRET 775 688 229 000 27 | www.cstb.fr

ÉTABLISSEMENT PUBLIC À CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL | RCS MEAUX 775 688 229 | TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

Projet R&D Confort des espaces de vie

Sous-tâche 2.3 : Confort visuel
Amélioration des formules de FLJ

Rapport d'avancement

PERRAUDEAU Michel

Université Paris-Est, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Direction
Santé Confort, Division Éclairage et Électromagnétisme

janvier 2015

© 2024 CSTB



Ce texte est distribué sous les termes de la licence Creative Commons Attribution 3.0 non transposé (CC BY 3.0)

Le texte complet de la licence est disponible à l'adresse suivante :
<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode>

Résumé des droits et conditions de la licence :

⇒ **Vous êtes libre de :**

- partager (reproduire, distribuer et communiquer) l'œuvre ;
- remixer, adapter l'œuvre ;
- d'utiliser cette œuvre à des fins commerciales.

⇒ **Selon les conditions suivantes :**

- Attribution (paternité, crédit) : vous devez attribuer l'œuvre de la manière indiquée par l'auteur de l'œuvre ou le titulaire des droits (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous approuvent, vous ou votre utilisation de l'œuvre).

Toute citation d'extraits, reproduction ou utilisation doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme : PERRAUDEAU M., Amélioration des formules de FLJ, CSTB, janvier 2015, 35 p., EN-DSC/ECE 14.30

⇒ Comprenant bien que

→ les droits suivants ne sont en aucune manière affectés par la licence :

- Vos prérogatives issues des exceptions et limitations aux droits exclusifs ou *fair use* ;
- Les droits moraux de l'auteur que rien dans ce contrat ne diminue ou ne restreint.

→ À chaque réutilisation ou distribution de cette œuvre, vous devez faire apparaître clairement au public la licence selon laquelle elle est mise à disposition. La meilleure manière de l'indiquer est un lien vers cette page web :
<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.fr>.

Résumé

Les formules permettant d'estimer l'éclairage naturel par l'intermédiaire du facteur de lumière du jour (FLJ) n'intègrent pas certains paramètres et/ou ne sont pas adaptées à la zone bénéficiant de la lumière du jour qui, depuis quelques années, s'est substitué au plan utile de même étendue que le sol.

Pour répondre au besoin de quantifier les apports de lumière du jour sur la zone qui en bénéficie, une formule est proposée. Elle peut être utilisée pour déterminer le FLJ pour une configuration de local et d'ouvertures mais elle peut aussi servir, pour un local donné, à dimensionner le produit surface vitrée \times transmission lumineuse pour obtenir le niveau de performance HQE souhaité.

En complément des formules existantes, des études paramétriques ont été menées afin d'évaluer l'influence de l'épaisseur du mur (pour une embrasure droite), celle de l'évasement éventuel de l'embrasure et celle des parties vitrées en-dessous le plan de travail. Dans tous les cas l'influence est couplée avec celle des facteurs de réflexion.

Mots clés : éclairage naturel, facteur de lumière du jour, étude paramétrique, fenêtre

Abstract

The formulas for estimating daylighting using daylight factor (DF) do not integrate some parameters and / or are not adapted to the area receiving daylight, which in recent years has replaced the working plane with the same surface as the floor.

To meet the need to quantify the contributions of daylight on the area receiving daylight a formula is proposed. It can be used to determine the DF for a given room and for given openings but can also be used for a given room, to size the product glazing surface \times light transmission to achieve the desired level of performance for the French High Environmental Quality (HQE).

Complementing the existing formulas, parametric studies were conducted to evaluate the influence of the thickness of the wall (for a right embrasure), of the possible widening of the embrasure and of the glazed parts below the working plane. In all cases the effect is coupled with the effect of the reflectances.

Keywords: daylighting, daylight factor, parametric study, window

Résumé long

L'estimation rapide des apports en lumière du jour passe par l'utilisation de formules donnant la valeur du facteur de lumière du jour (FLJ) correspondant à la configuration local/fenêtres. Dans certains cas, le FLJ sert aussi au calcul de l'autonomie en lumière du jour. Même si ces formules ne prétendent pas fournir une valeur exacte du FLJ, elles ne prennent pas forcément en compte certains des paramètres ayant une influence notable et/ou elles ne sont pas adaptées à la caractérisation de l'éclairage naturel sur la zone d'accès à la lumière du jour. Cette dernière notion s'est substituée au plan utile "classique", c'est-à-dire à un plan utile de même étendue que le sol. L'objet du travail mené en 2014 est de remédier, partiellement dans un premier temps, à ces deux limites.

Pour caractériser ce que l'on obtient sur la zone d'accès à la lumière du jour, une formule est proposée. Elle est adaptée au FLJ définissant le niveau de performance du référentiel HQE, c'est-à-dire à la valeur atteinte ou dépassée sur 80 % de la surface de la zone de premier rang. La formule proposée fait intervenir la largeur du local, la profondeur du local, les facteurs de réflexion des parois du local et l'épaisseur du mur où se trouvent les ouvertures. Elle peut être utilisée pour calculer le FLJ pour une configuration local/fenêtres donnée mais aussi pour dimensionner la surface vitrée à mettre en œuvre pour obtenir le FLJ souhaité.

L'épaisseur de mur est un paramètre souvent négligé ou intégré de façon insatisfaisante. À partir d'une étude paramétrique portant sur un grand nombre de configurations géométriques (inclinaison, largeur, hauteur, épaisseur de mur) et photométriques (facteur de réflexion de l'embrasement) de fenêtres il est proposé de relier le rendement lumineux (par ciel couvert) de la fenêtre à l'indice de la fenêtre (qui fait intervenir les 3 dimensions) et au facteur de réflexion de l'embrasement. Cette information peut ensuite être utilisée pour moduler la valeur de FLJ obtenu avec une formule qui ne prendrait pas en compte l'épaisseur du mur réelle. En complément une autre étude paramétrique a été effectuée pour évaluer l'influence de l'évasement de la fenêtre, toujours en liaison avec le facteur de réflexion de l'embrasement.

Les parties vitrées situées en-dessous du plan de travail sur lequel on calcule le FLJ ne sont jamais prises en compte dans les formules. Quand on est éclairé avec de telles fenêtres on sous-estime donc le FLJ sur le plan de travail mais sans savoir de combien. L'étude paramétrique qui a été effectuée sur de nombreuses configurations de local (largeur, profondeur et facteurs de réflexion) et de fenêtres (nombre, largeur et hauteur) a permis de quantifier l'impact de ces parties basses vitrées. Pour des locaux avec parois claires et allège complètement vitrée ces apports peuvent représenter plus de 10 % des apports des parties hautes vitrées.

Ces résultats peuvent être utilisés pour améliorer les formules présentes dans les différents outils logiciels. Cependant la formule proposée pour le FLJ moyen sur la zone d'accès à la lumière du jour mériterait d'être affinée pour améliorer sa représentativité. De même l'influence de l'épaisseur du mur et de l'évasement de l'embrasement pourrait être évaluée en termes de FLJ sur le plan de travail et non pas seulement en termes de flux entrant.

Table des matières

INTRODUCTION.....	9
1. LES FORMULES POUR ESTIMER LE FLJ	9
1.1 La formule du CIBSE [1]	9
1.2 La formule de la norme EN 15193 [5]	10
2. L'EVALUATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL A PARTIR DU FLJ	11
2.1 Le référentiel HQE.....	11
2.2 La norme EN 15193.....	12
2.3 L'autonomie en lumière du jour	12
3. RESULTATS.....	12
3.1 Proposition d'une formule adaptée AU FLJ sur la zone d'accès à la lumière du jour	12
3.1.1 Coefficient pour la prise en compte de la largeur et de la profondeur du local	14
3.1.2 Coefficient pour la prise en compte des facteurs de réflexion des parois intérieures.....	14
3.1.3 Coefficient pour la prise en compte de l'épaisseur du mur	14
3.1.4 Validation de la formule	15
3.1.5 Utilisation de la formule pour du dimensionnement.....	15
3.2 Prise en compte de l'influence de l'épaisseur et de l'évasement du mur.....	16
3.2.1 Influence de l'épaisseur du mur pour un évasement droit.....	17
3.2.2 Influence de l'évasement	20
3.3 Prise en compte des surfaces vitrées en-dessous du plan utile.....	22
3.3.1 Influence de la clarté de l'ensemble des parois.....	23
3.3.2 Influence de la clarté du sol.....	25
CONCLUSION.....	26
LISTE DES REFERENCES.....	28
ANNEXES	29
ANNEXE 1 : COURBE GÉNÉRIQUE DE LA TRANSMISSION LUMINEUSE DU VITRAGE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE.....	30
ANNEXE 2 : POLYNOMES POUR LE RENDEMENT D'UNE OUVERTURE A EMBRASURE DROITE EN FONCTION DE L'INVERSE DE L'INDICE K DE LA FENÊTRE	31
ANNEXE 3 : FACTEUR DE FORME ENTRE PERCEMENTS INTÉRIEUR ET EXTERIEUR D'UNE FENÊTRE A EMBRASURE EVASEE	33
ANNEXE 4 : POLYNOMES POUR LE RENDEMENT D'UNE OUVERTURE A EMBRASURE EVASEE EN FONCTION DU FACTEUR DE FORME DE LA FENÊTRE	34

Liste des tableaux

Tableau 1 – Niveaux de performance pour le référentiel HQE	11
Tableau 2 – Classification de l'éclairage naturel selon la norme EN 15193	12
Tableau 3 – Constantes pour le coefficient associé à la largeur et à la profondeur du local	14
Tableau 4 – Produits $A_w \cdot TL$ à prévoir en fonction du FLJ cible	16
Tableau 5 – Paramètres de l'étude paramétrique	17
Tableau 6 – Les deux ouvertures illustrant l'utilisation des résultats	19
Tableau 7 – Rendements lumineux pour les deux ouvertures en présence de vitrage	20
Tableau 8 – Apports de l'évasement sur le rendement lumineux de l'ouverture en présence de vitrage	22
Tableau 9 – Paramètres de l'étude paramétrique pour l'influence des parties basses vitrées	23
Tableau 10 – Augmentation relative du FLJ pour une hauteur de vitrage au-dessus du plan utile de 1,2 m pour trois clartés de local	24
Tableau 11 – Augmentation relative du FLJ pour une hauteur de vitrage au-dessus du plan utile de 1,2 m pour trois valeurs de facteur de réflexion du sol	26

Liste des figures

Figure 1 – Relation entre l'éclairement calculé par la formule proposée et celui obtenu avec PHANIE	15
Figure 2 – Repérage de l'angle d'évasement de l'embrasure	17
Figure 3 – Rendement lumineux d'une fenêtre verticale sans vitrage en fonction de l'inverse de l'indice de la fenêtre	18
Figure 4 – Rendement lumineux d'une fenêtre verticale sans vitrage en fonction du facteur de forme de la fenêtre	21
Figure 5 – Relation entre l'augmentation relative du FLJ et l'augmentation relative de la surface vitrée pour trois clartés de local	24
Figure 6 – Relation entre l'augmentation relative du FLJ et l'augmentation relative de la surface vitrée pour trois valeurs de facteur de réflexion du sol	25

INTRODUCTION

Souvent considéré à part du confort visuel, le niveau d'éclairage (qui doit être adapté à l'activité) constitue bien le premier critère de confort visuel. Si en éclairage artificiel c'est bien ce niveau d'éclairage qui est déterminé dans le cadre d'un projet, il en est différemment en éclairage naturel ou l'on raisonne en termes de facteur de lumière du jour (FLJ), c'est-à-dire en termes de rapport entre l'éclairage intérieur et l'éclairage extérieur de référence.

Dans une première approche ou dans une phase de dimensionnement des ouvertures, il est souvent fait appel à des formules plus ou moins empiriques pour relier le FLJ à la surface vitrée. Les deux principales formules disponibles, celle du CIBSE et celle de la norme EN 15193, ne calculent pas exactement la même chose et ne sont pas basées sur les mêmes hypothèses. L'une comme l'autre présentent des "lacunes" sur quelques paramètres.

Comme l'évaluation des performances en éclairage naturel se fait souvent sur la base d'une classification basée sur des seuils de FLJ, il est important que l'ensemble des paramètres ayant une influence notable soit pris en compte pour qu'au travers la valeur du FLJ résultante on estime "correctement" ces performances.

Les résultats présentés dans ce rapport sont relatifs à l'éclairage naturel de locaux vides pour lesquels on calcule le FLJ sur un plan utile virtuel. Ceci ne présage en rien des performances une fois les locaux aménagés et meublés.

1. LES FORMULES POUR ESTIMER LE FLJ

Les deux formules présentées dans les paragraphes suivants sont basées sur la surface vitrée totale. Elles ne permettent donc pas de rendre compte de l'influence de la forme des ouvertures ni du positionnement de celles-ci (principalement en termes de hauteur d'allège). Pour les configurations d'ouverture généralement rencontrées ces deux paramètres (forme et position) ont une influence faible mais qui est néanmoins non négligeable.

1.1 LA FORMULE DU CIBSE [1]

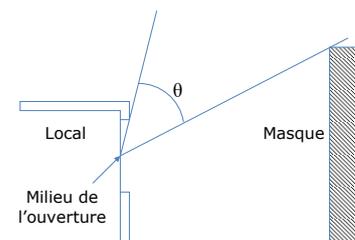
La formule est celle proposée par Crisp et Littlefair en 1984 [2]. Elle est issue de celles proposées par Longmore en 1975 [3] et Lynes en 1979 [4]. Elle s'exprime sous la forme :

$$FLJ = \frac{\tau_{df} \cdot A_w \cdot \theta}{A \cdot (1 - \rho_m^2)} \text{ [en \%]}$$

avec τ_{df} facteur de transmission en incidence diffuse

A_w surface vitrée

θ angle de vue du ciel (en °)



A surface totale des parois intérieures

ρ_m facteur de réflexion moyen des parois intérieures

Pour un verre clair le facteur de transmission en incidence diffuse peut être pris égal à la transmission lumineuse TL donnée par le fabricant multipliée par 0,85 pour tenir compte des incidences multiples de la lumière.

La surface vitrée est la surface vitrée située au-dessus du plan utile.

L'angle de vue du ciel tel qu'il est défini permet de prendre en compte l'épaisseur du mur. Le masque qui fait face aux ouvertures ne réfléchit pas de lumière vers les ouvertures.

Le FLJ ainsi obtenu est une moyenne sur un plan utile de même étendue que le sol, mais la hauteur du plan utile n'est pas précisée. Cette formule peut donc s'appliquer à n'importe quel plan horizontal, à condition que la surface vitrée prise en compte ne soit que celle située au-dessus du plan utile. La répartition du FLJ sur le plan utile dépend de la hauteur de celui-ci mais la valeur moyenne varie assez peu (à surface vitrée égale).

Cette formule a servi de base à la formule qui a été intégrée dans la méthode de calcul de la RT.

Son principal point faible réside dans le fait que les parties vitrées situées en-dessous du plan utile ne contribuent pas au FLJ sur le plan de travail. La prise en compte de l'épaisseur du mur au travers l'angle θ peut être assez imprécise quand la hauteur de la fenêtre est très différente de sa largeur.

1.2 LA FORMULE DE LA NORME EN 15193 [5]

Dans cette norme, relative à une méthode d'évaluation des consommations pour l'éclairage, on utilise une formule donnant le FLJ en fonction de la surface vitrée est des éventuels masques extérieurs. Cette formule s'exprime sous la forme :

$$D_{Rb} = (4,13 + 20,0 \cdot I_{Tr} - 1,36 \cdot I_{RD}) I_{Sh} \text{ en } \%$$

avec I_{Tr} indice de transparence

I_{RD} indice de profondeur de l'espace

I_{Sh} indice d'occultation

D_{Rb} est le "facteur de lumière du jour" :

- sur une ligne située à mi profondeur de la zone bénéficiant de la lumière du jour ; cette zone est identique à la zone d'accès à la lumière du jour de la RT : sa profondeur est 2,5 fois la distance entre la hauteur sous linteau et la hauteur du plan de travail
- obtenu en considérant la surface de percement au-dessus du plan utile ; le "vrai" FLJ est obtenu en multipliant D_{Rb} par un coefficient qui intègre la

transmission lumineuse du vitrage en incidence diffuse et la présence des menuiseries

L'indice de transparence I_{Tr} est le rapport entre la surface d'ouverture (au-dessus du plan utile) et la surface de la zone bénéficiant de la lumière du jour.

L'indice de profondeur de l'espace I_{RD} est le rapport entre la profondeur de la zone bénéficiant de la lumière du jour et la distance entre hauteur sous linteau et hauteur du plan utile. Cet indice vaut normalement 2,5. Quand la profondeur réelle du local n'est pas beaucoup plus importante que la profondeur de la zone bénéficiant de la lumière du jour, on considère que toute la profondeur bénéficie de la lumière du jour ; l'indice I_{RD} est alors un peu plus grand que 2,5.

L'indice d'occultation I_{Sh} tient compte de "tous" les effets qui limitent la quantité de lumière du jour incidente sur la façade : obstruction linéaire, projection horizontale, projection verticale, cour intérieure ou patio et doubles façades vitrées.

Cette formule présente un double intérêt : elle est relative à la zone bénéficiant de la lumière du jour et elle permet de prendre en compte plusieurs types de masques extérieurs. Son principal défaut réside dans le fait qu'a priori, elle correspond à des ouvertures dans un mur sans épaisseur. Elle est valide pour un local dont les parois ont des facteurs de réflexion "standards".

2. L'EVALUATION DE L'ECLAIRAGE NATUREL A PARTIR DU FLJ

Quand le FLJ est obtenu à partir de logiciels le résultat dépend de la représentativité des données géométriques et photométriques avec lesquelles les calculs sont effectués.

L'utilisation de formules telles que celles présentées dans les paragraphes précédents

2.1 LE RÉFÉRENTIEL HQE

Dans le référentiel HQE, le facteur de lumière du jour correspond à une valeur à atteindre pour satisfaire au niveau de performance que l'on s'est donné comme objectif pour la cible 10.1 (Tableau 1).

Tableau 1 – Niveaux de performance pour le référentiel HQE

Facteur de lumière du jour sur 80 % de la zone de premier rang	Niveau de performance
1,5 %	Base
2,0 %	Performant
2,5 %	Très performant

2.2 LA NORME EN 15193

À partir de la valeur du "facteur de lumière du jour" D_{Rb} (sans menuiseries ni vitrage, mais avec des éventuels masques extérieurs) la norme établit une classification des situations d'éclairage naturel (Tableau 2).

Tableau 2 – Classification de l'éclairage naturel selon la norme EN 15193

Facteur de lumière du jour de l'ossature brute D_{Rb}	Classification de la disponibilité de la lumière du jour
$D_{Rb} \geq 6 \%$	Forte
$6 \% > D_{Rb} \geq 4 \%$	Moyenne
$4 \% > D_{Rb} \geq 2 \%$	Faible
$D_{Rb} < 2 \%$	Aucune

Quand on intègre les menuiseries et le vitrage, les seuils de FLJ sont alors environ divisés par deux.

Si on obtient un FLJ juste au-dessus d'une valeur seuil, le fait de ne pas avoir pris en compte l'épaisseur du mur ainsi que les éventuelles parties vitrées en-dessous du plan utile va permettre de satisfaire à la disponibilité recherchée alors que cela n'est peut-être pas le cas.

2.3 L'AUTONOMIE EN LUMIÈRE DU JOUR

La RT comme la norme EN 15193 utilisent leur formule de FLJ pour calculer l'autonomie en lumière du jour. Il devrait en être de même avec la future norme européenne sur l'éclairage naturel. Ce mode de fonctionnement oblige à faire certaines hypothèses afin de généraliser la formule du FLJ (par ciel couvert) à n'importe quelle situation lumineuse extérieure. Pour que l'autonomie ainsi estimée soit "représentative" il convient que les paramètres ayant le plus d'influence soient pris en compte pour la détermination du FLJ.

3. RESULTATS

Dans les paragraphes suivants tous les calculs des études paramétriques ont été effectués avec le logiciel PHANIE du CSTB en utilisant la méthode de radiosité hiérarchique.

3.1 PROPOSITION D'UNE FORMULE ADAPTEE AU FLJ SUR LA ZONE D'ACCES A LA LUMIERE DU JOUR

La notion de zone d'accès à la lumière du jour (ou bénéficiant de la lumière du jour, ou de premier rang) s'est imposée ces dernières années au détriment d'un plan utile de même étendue que le sol.

Seule la formule de la norme EN 15193 se réfère à la zone bénéficiant de la lumière du jour, mais elle ne fournit la valeur du FLJ que sur une ligne située à mi profondeur. De plus, elle ne prend pas en compte l'épaisseur du mur.

Dans le cadre d'un travail de stage [6] une étude paramétrique a été effectuée avec pour objectif de définir la valeur seuil du produit $A_w \cdot TL$ (surface vitrée \times transmission lumineuse) qui permette d'obtenir le niveau de performance souhaité dans le référentiel HQE. La même démarche aurait être suivie pour :

- calculer le FLJ issue d'une configuration d'ouverture (comme les formules classiques)
- se référer, non pas au FLJ à atteindre sur 80 % de la zone de premier rang, mais au FLJ moyen sur la zone d'accès à la lumière du jour

Note : pour cette étude on se trouve en situation de site parfaitement dégagé

Les paramètres étudiés dans le cadre de cette étude sont :

- ceux relatifs au local : largeur, profondeur et facteurs réflexion des parois
- ceux relatifs aux fenêtres : nombre, largeur, hauteur, hauteur d'allège et épaisseur du mur

De l'ensemble des configurations ayant fait l'objet des calculs, il ressort que les paramètres étudiés peuvent être classés en deux catégories en fonction de leur influence :

- ceux de grande influence : la largeur et la profondeur du local ainsi que les facteurs de réflexion des parois intérieures
- ceux avec une influence moindre : l'épaisseur du mur et la hauteur d'allège

L'objectif est de chercher à relier le FLJ à atteindre au produit $A_w \cdot TL$. En pratique, les calculs ont été faits pour des configurations d'ouvertures pour lesquelles on a calculé la valeur de l'éclairement intérieur pour un éclairement extérieur de 10 000 lux. On a alors une formule du type :

$$A_w \cdot TL = \frac{E_{int}}{k} \text{ ou } E_{int} = k \cdot A_w \cdot TL$$

Comme le FLJ est le rapport entre l'éclairement intérieur E_{int} et l'éclairement extérieur de 10 000 lux, la formule précédente peut s'écrire :

$$A_w \cdot TL = \frac{FLJ \cdot 100}{k} \text{ ou } FLJ = \frac{k \cdot A_w \cdot TL}{100} \text{ avec } FLJ \text{ exprimé en } \%$$

Initialement le coefficient k devait être le produit des influences des différents paramètres. Devant la complexité des différents termes auxquels il aurait fallu se référer, il a été décidé d'établir la relation ci-dessus pour les deux principaux paramètres (largeur et profondeur du local) dans des conditions "standard" pour les facteurs de réflexion des parois et d'épaisseur de mur. Le résultat ainsi obtenu est alors modulé pour tenir compte des facteurs de réflexion et de l'épaisseur réels.

3.1.1 COEFFICIENT POUR LA PRISE EN COMPTE DE LA LARGEUR ET DE LA PROFONDEUR DU LOCAL

L'influence de la profondeur du local diffère selon que cette profondeur est inférieure ou supérieure à la profondeur de la zone de premier rang. Dans le premier cas, en raison des interrélflexions "importantes" sur le mur du fond les gradients de FLJ en fonction de la profondeur sont plus importants. C'est pourquoi les deux cas de figure sont traités indépendamment. Mais dans les deux cas on peut regrouper la profondeur P et la largeur L dans un même coefficient de la forme :

$$k_1 = (a \cdot P + b) \cdot L^p$$

où a , b et p sont des constantes qui ont les valeurs du Tableau 3.

Tableau 3 – Constantes pour le coefficient associé à la largeur et à la profondeur du local

	a	b	p
Profondeur \leq Profondeur de la zone de premier rang	-94,5	500,5	-0,8
Profondeur $>$ Profondeur de la zone de premier rang	-4,5	123,9	-0,6

3.1.2 COEFFICIENT POUR LA PRISE EN COMPTE DES FACTEURS DE REFLEXION DES PAROIS INTERIEURES

Comme dans la formule du BRE, cette prise en compte se fait par l'intermédiaire du facteur de réflexion moyen des parois intérieures obtenu par pondération des différentes surfaces (plafond, murs, vitrages et sol).

Quand seuls les facteurs de réflexion varient dans les limites retenues, on observe que le domaine de variation du FLJ se situe, en première approche, entre -20 % et + 20 % par rapport à la valeur obtenue pour les facteurs de réflexion standard (0,7 pour le plafond, 0,5 pour les murs et 0,2 pour le sol).

On peut alors représenter l'influence des facteurs de réflexion par :

$$k_2 = 1,74 \cdot \rho_m + 0,18$$

où ρ_m est le facteur de réflexion moyen des parois intérieures.

3.1.3 COEFFICIENT POUR LA PRISE EN COMPTE DE L'ÉPAISSEUR DU MUR

En appliquant la même démarche que pour les facteurs de réflexion, et en se référant à une épaisseur de mur standard de 0,35 m (pour laquelle le coefficient vaut 1), on obtient le coefficient suivant :

$$k_3 = -1,51 \cdot e + 1,53$$

où e est l'épaisseur du mur (en m).

3.1.4 VALIDATION DE LA FORMULE

Les coefficients k_i définis ci-dessus permettent de retrouver le produit $A_w \cdot TL$ ou l'éclairement intérieur E_{int} par :

$$A_w \cdot TL = \frac{E_{int}}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \text{ ou } E_{int} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot A_w \cdot TL$$

Quand on applique cette formule à des configurations différentes de celles à partir desquelles elle a été établie mais avec des valeurs de paramètres comprises dans les limites testées, on trouve pour la valeur de l'éclairement intérieur les résultats de la Figure 1. Rappel : cet éclairement est celui dépassé sur 80 % de la surface de la zone de premier rang.

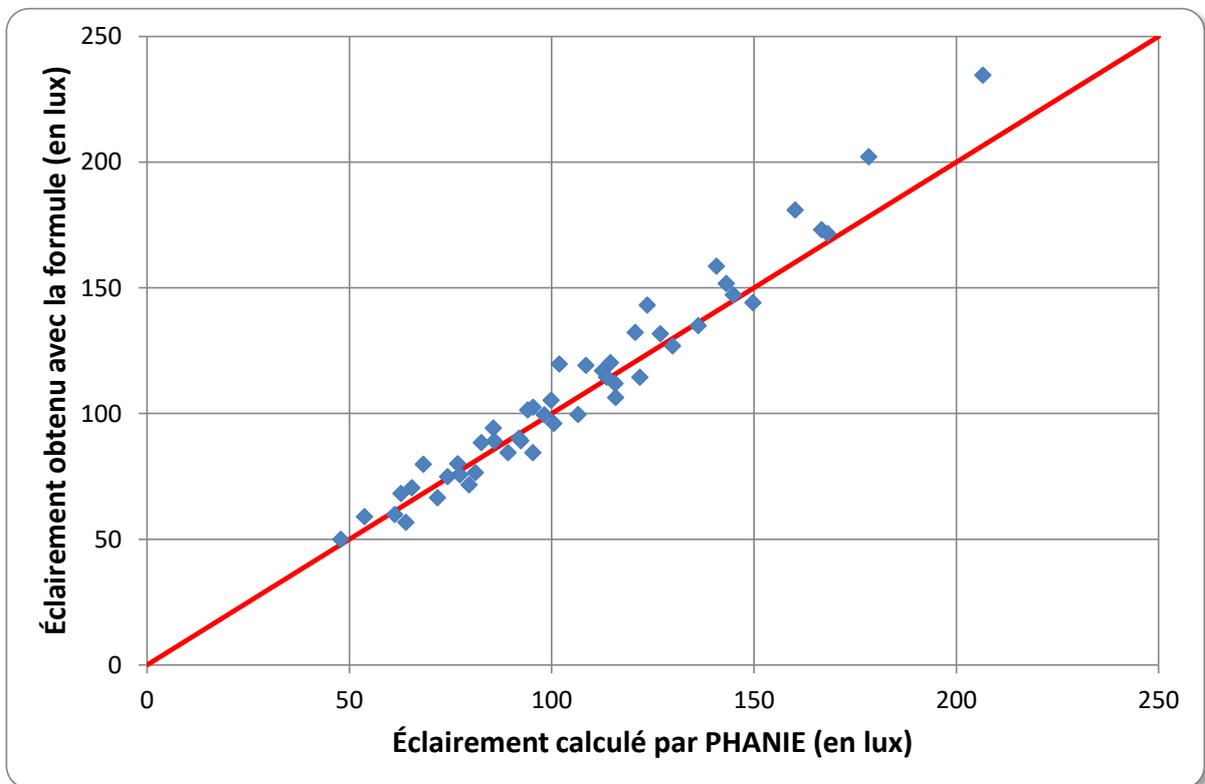


Figure 1 – Relation entre l'éclairement calculé par la formule proposée et celui obtenu avec PHANIE

3.1.5 UTILISATION DE LA FORMULE POUR DU DIMENSIONNEMENT

On utilise alors la forme suivante de la formule :

$$A_w \cdot TL = \frac{FLJ \cdot 100}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}$$

Pour obtenir l'un des 4 seuils de FLJ du référentiel HQE dans les conditions suivantes :

- largeur de local : 5 m
- profondeur de local : 5 m
- facteurs de réflexion des parois : 761
- épaisseur de mur : 0,4 m

les valeurs des coefficients k_1 sont les suivantes : $k_1 = 39,66$; $k_2 = 1,05$; $k_3 = 0,93$.

Les produits $A_w \cdot TL$ sont alors ceux du Tableau 4.

Tableau 4 – Produits $A_w \cdot TL$ à prévoir en fonction du FLJ cible

	FLJ CIBLE			
	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %
$A_w \cdot TL$	2,6	3,9	5,2	6,5
A_w si $TL = 0,7$	3,7 m ²	5,6 m ²	7,4 m ²	9,3 m ² *
* Surface supérieure à la surface de façade au-dessus du plan utile				

3.2 PRISE EN COMPTE DE L'INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR ET DE L'ÉVASEMENT DU MUR

L'influence de l'épaisseur du mur a été étudiée uniquement en termes de rendement lumineux global de l'ouverture dans des conditions de ciel couvert, c'est-à-dire dans l'optique de l'influence sur le FLJ. Mais celle-ci n'a pas été étudiée directement.

L'étude paramétrique qui a été menée a porté sur les paramètres du Tableau 5. L'angle caractérisant l'évasement est celui défini sur la Figure 2.

Tableau 5 – Paramètres de l'étude paramétrique

PARAMETRE	VALEURS
Largeur de la fenêtre	De 0,5 m à 2,5 m par pas de 0,5 m
Hauteur de la fenêtre	De 0,5 m à 2,5 m par pas de 0,5 m
Épaisseur du mur	De 0 à 0,5 m par pas de 0,1 m
Facteur de réflexion de l'embrasure	0, 0,5 et 0,8
Évasement de l'embrasure (α)	De 0° à 45° par pas de 15°
Vitrage	Sans ou vitrage générique*
Inclinaison de l'ouverture	0°, 45° et 90°**
Type de ciel couvert	Uniforme et M & S***

* Le vitrage générique est représenté par une courbe de transmission relative en fonction de l'angle d'incidence (voir Annexe 1)

** L'inclinaison 90° correspond à une ouverture verticale et l'inclinaison 0° à une ouverture horizontale

*** Le ciel couvert M & S (pour Moon & Spencer) est le ciel couvert normalisé par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). Il est trois fois plus lumineux au zénith qu'à l'horizon

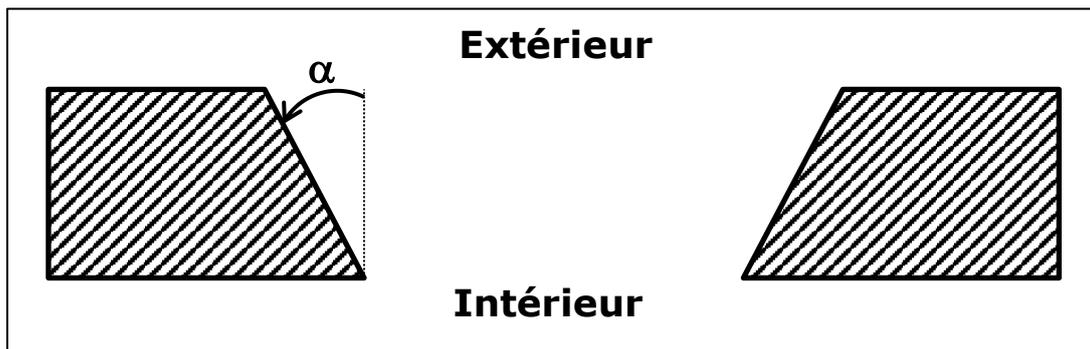


Figure 2 – Repérage de l'angle d'évasement de l'embrasure

3.2.1 INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DU MUR POUR UN ÉVASÉMENT DROIT

Le paramètre retenu pour représenter la géométrie de l'ouverture est basé sur l'analogie avec la méthode normalisée en éclairage artificiel intérieur. Dans cette méthode on a introduit la notion d'indice de local pour représenter le facteur de forme entre un plan émetteur (le plan des luminaires) et un plan récepteur parallèle (le plan utile). Pour une fenêtre on parlera d'indice de la fenêtre où le plan émetteur est le percement au niveau du nu extérieur et le plan récepteur est le percement au niveau du nu intérieur.

L'indice de la fenêtre est défini ainsi :

$$K = \frac{l \cdot h}{e \cdot (l + h)}$$

avec l largeur de la fenêtre

h hauteur de la fenêtre

e épaisseur du mur

Avec les valeurs considérées pour ces trois dimensions, l'indice de la fenêtre varie entre 0,5 et 12,5.

Les autres paramètres qui interviennent sur la performance lumineuse de la fenêtre sont le facteur de réflexion de l'embrasure, l'inclinaison de la fenêtre et le modèle de ciel utilisé.

La performance lumineuse de la fenêtre est exprimée en termes de rendement lumineux. Celui-ci correspond au rapport entre le flux sortant côté intérieur et le flux entrant côté extérieur.

Quand on exprime le rendement lumineux de la fenêtre en fonction de l'inverse de l'indice de la fenêtre on trouve les résultats de la Figure 3. Ce rendement est donné pour les trois valeurs du facteur de réflexion de l'embrasure et pour les deux modèles de ciel représentatifs des ciels couverts.

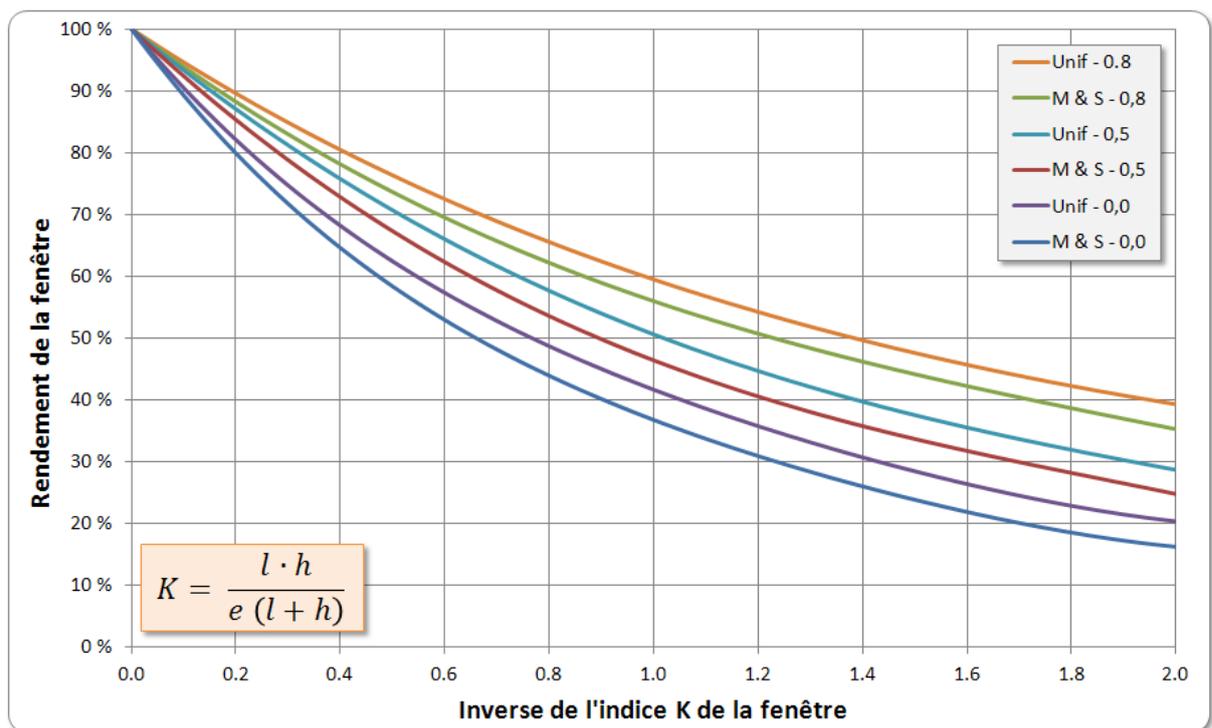


Figure 3 – Rendement lumineux d'une fenêtre verticale sans vitrage en fonction de l'inverse de l'indice de la fenêtre

Chacune des courbes de la Figure 3 peut être représentée par un polynôme de degré 4. Ces résultats sont donnés en Annexe 2.

Pour illustrer l'utilisation de ces résultats et évaluer l'influence de l'épaisseur du mur on s'est intéressé aux deux ouvertures décrites dans le Tableau 6 :

- l'ouverture 1 illustre la valeur du coefficient à appliquer aux résultats obtenus avec une formule de FLJ qui ne prend pas en compte l'épaisseur du mur
- l'ouverture 2 est là pour illustrer la diminution des apports en lumière du jour quand l'épaisseur du mur passe de 0,3 m à 0,5 m (dans le cas d'une isolation par l'extérieur, par exemple)

Tableau 6 – Les deux ouvertures illustrant l'utilisation des résultats

	OUVERTURE 1	OUVERTURE 2
Largeur	1,2 m	1,2 m
Hauteur	1,2 m	1,2 m
Épaisseur du mur	0,3 m	0,5 m
Indice K	2,0	1,2
Inverse de l'indice K	0,50	0,83

Quand on calcule le rendement lumineux pour les différents paramètres associés à une embrasure droite, on obtient les résultats du Tableau 7. Le paramètre le plus influant est le facteur de réflexion de l'embrasure :

- **pour une embrasure noire**, le coefficient à appliquer pour prendre en compte l'épaisseur de 0,3 m est compris entre 0,61 et 0,71 ; la diminution des apports quand l'épaisseur passe à 0,5 est comprise entre 22 et 25 % de la valeur pour l'épaisseur 0,3
- **pour une embrasure de facteur de réflexion 0,5**, le coefficient à appliquer pour prendre en compte l'épaisseur de 0,3 m est compris entre 0,69 et 0,78 ; la diminution des apports quand l'épaisseur passe à 0,5 est comprise entre 19 et 20 % de la valeur pour l'épaisseur 0,3
- **pour une embrasure de facteur de réflexion 0,8**, le coefficient à appliquer pour prendre en compte l'épaisseur de 0,3 m est compris entre 0,74 et 0,82 ; la diminution des apports quand l'épaisseur passe à 0,5 est comprise entre 14 et 15 % de la valeur pour l'épaisseur 0,3

Tableau 7 – Rendements lumineux pour les deux ouvertures en présence de vitrage

INCLINAISON	TYPE DE CIEL	FACTEUR DE REFLEXION	OUVERTURE 1	OUVERTURE 2	$\frac{Ouv. 2 - Ouv. 1}{Ouv. 1}$
Verticale 0°	M & S	0,0	0,61	0,46	-25 %
		0,5	0,69	0,55	-20 %
		0,8	0,74	0,62	-15 %
	Unif	0,0	0,66	0,51	-23 %
		0,5	0,73	0,59	-19 %
		0,8	0,77	0,66	-14 %
45°	M & S	0,0	0,71	0,56	-22 %
		0,5	0,78	0,63	-19 %
		0,8	0,82	0,69	-15 %
	Unif	0,0	0,70	0,55	-22 %
		0,5	0,77	0,62	-19 %
		0,8	0,80	0,68	-15 %
Horizontale 90°	M & S	0,0	0,71	0,55	-22 %
		0,5	0,77	0,63	-19 %
		0,8	0,81	0,69	-15 %
	Unif	0,0	0,66	0,50	-23 %
		0,5	0,73	0,58	-20 %
		0,8	0,77	0,66	-15 %

3.2.2 INFLUENCE DE L'ÉVASEMENT

Pour représenter l'influence de l'évasement, l'indice de la fenêtre ne peut plus être utilisé car les deux percements (extérieur et intérieur) n'ont plus la même surface. On se réfère alors directement au facteur de forme entre ces deux "surfaces". Pour une telle configuration géométrique, le facteur de forme est facilement exprimable sous forme analytique (Annexe 3).

Quand on exprime le rendement lumineux de la fenêtre en fonction du facteur de forme de la fenêtre on trouve les résultats de la Figure 3. Ce rendement est donné pour les trois valeurs du facteur de réflexion de l'embrasement. Étant donné le peu d'impact du type de ciel observé pour l'influence de l'épaisseur de mur, les calculs relatifs à l'évasement ont été effectués par ciel uniforme.

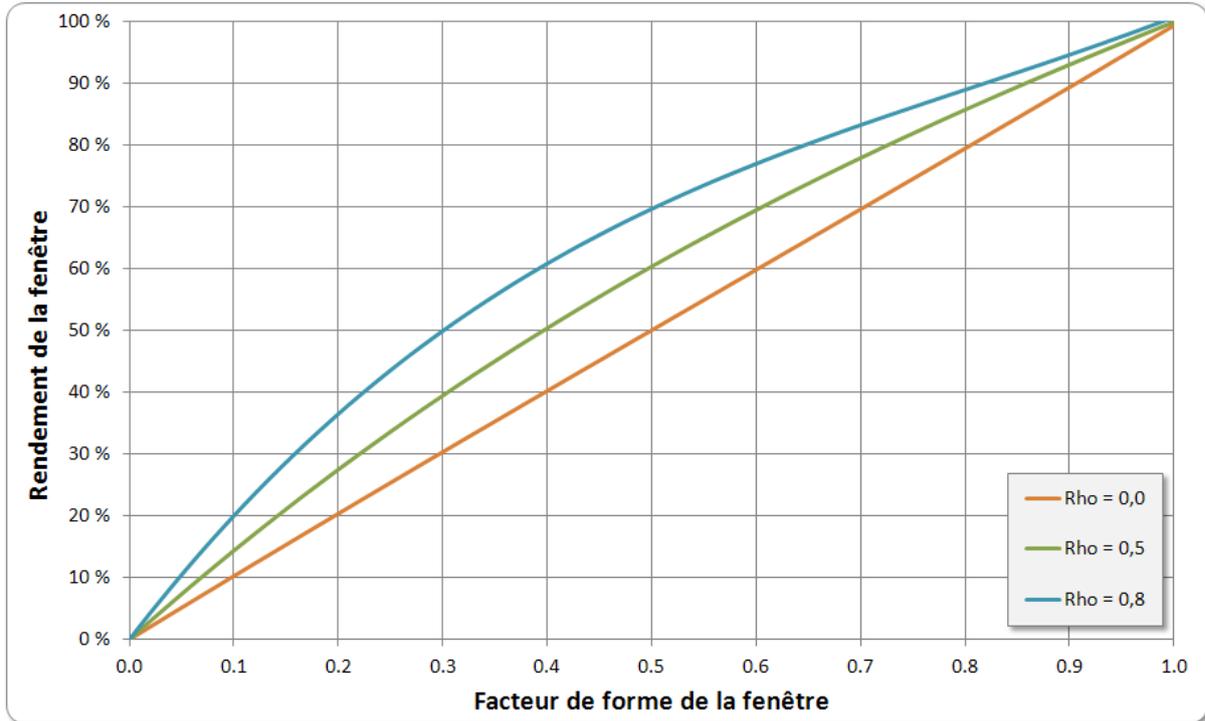


Figure 4 - Rendement lumineux d'une fenêtre verticale sans vitrage en fonction du facteur de forme de la fenêtre

Chacune des courbes de la Figure 4 peut être représentée par un polynôme de degré 3. Ces résultats sont donnés en Annexe 4.

Pour les ouvertures 1 et 2 du Tableau 6, faire varier l'évasement de 0° à 45° conduit aux résultats du Tableau 8.

Tableau 8 – Apports de l'évasement sur le rendement lumineux de l'ouverture en présence de vitrage

ÉVASEMENT	FACTEUR DE REFLEXION	OUVERTURE 1		OUVERTURE 2	
		RENDEMENT	APPORTS DE L'EVASEMENT	RENDEMENT	APPORTS DE L'EVASEMENT
0°	0,0	67 %		51 %	
	0,5	73 %		60 %	
	0,8	78 %		67 %	
15°	0,0	71 %	7 %	58 %	13 %
	0,5	78 %	7 %	67 %	12 %
	0,8	83 %	6 %	74 %	11 %
30°	0,0	75 %	12 %	63 %	23 %
	0,5	82 %	11 %	72 %	20 %
	0,8	86 %	10 %	78 %	17 %
45°	0,0	78 %	17 %	66 %	30 %
	0,5	84 %	14 %	75 %	26 %
	0,8	88 %	13 %	81 %	21 %

3.3 PRISE EN COMPTE DES SURFACES VITREES EN-DESSOUS DU PLAN UTILE

Les parties de vitrage situées en-dessous du plan utile (celui sur lequel on calcul les apports de lumière du jour en termes de FLJ) ne doivent pas être intégrées à la surface vitrées des formules car elles ne contribuent pas à l'éclairage direct du plan utile. On ne peut cependant pas complètement les exclure car, par le biais des interrélaxions entre les parois du local, elles contribuent aussi à l'éclairage indirect du plan utile.

Pour évaluer les apports de ces parties vitrées l'étude paramétrique a été menée avec les valeurs du Tableau 9. Les conditions fixes sont les suivantes :

- Ciel uniforme
- Épaisseur de mur : 0,3 m
- Ouvertures verticales
- Hauteur du plan utile (PU) : 0,8 m

Tableau 9 – Paramètres de l'étude paramétrique pour l'influence des parties basses vitrées

PARAMETRE	VALEURS
Largeur de la fenêtre	De 1 m à 2 m par pas de 0,5 m
Hauteur de la fenêtre au-dessus du PU	De 1,2 m à 1,7 m par pas de 0,25 m
Hauteur d'allège	De 0 m à 0,8 m par pas de 0,2 m
Nombre d'ouverture	De 1 à 5 selon la largeur du local (une par trame de 2,5 m de large)
Largeur du local en façade	De 2,5 m à 12,5 m par pas de 2,5 m
Profondeur du local	1 fois et 1,5 fois la profondeur de la zone d'accès à la lumière du jour*
Facteurs de réflexion des parois	641, 752 et 863**
<p>* La profondeur de la zone d'accès à la lumière du jour est définie comme valant 2,5 fois la distance entre la hauteur sous linteau et le plan utile (à 0,8 m du sol)</p> <p>** 641 correspond à un local "sombre" (plafond→0,6 ; murs→0,4 ; sol→0,1) 752 correspond à un local "moyen" (plafond→0,7 ; murs→0,5 ; sol→0,2) 863 correspond à un local "clair" (plafond→0,8 ; murs→0,6 ; sol→0,3) Pour évaluer l'impact du sol seul, les combinaisons 751, 752 et 753 ont aussi été comparées</p>	

L'éclairage naturel est caractérisé par le FLJ moyen sur la zone d'accès à la lumière du jour telle qu'elle est définie dans la RT et dans la norme EN 15193, c'est-à-dire avec une profondeur égale à 2,5 fois la distance entre la hauteur sous linteau et la hauteur du plan utile.

3.3.1 INFLUENCE DE LA CLARTE DE L'ENSEMBLE DES PAROIS

Les trois configurations comparées sont les trois configurations principales du Tableau 9 : 641, 752 et 863.

Les résultats, illustrés par la Figure 5, sont présentés sous la forme du pourcentage d'augmentation relative du FLJ sur le plan utile en fonction du pourcentage d'augmentation de la surface vitrée (rapport entre surface vitrée en-dessous du plan utile et surface vitrée au-dessus du plan utile).

Sur cette figure, chacun des points est la moyenne des résultats obtenus pour l'ensemble des configurations local/ouverture ; les barres d'erreur correspondent à l'écart type. Ce résultat ne doit être pris que comme une valeur indicative des apports potentiels.

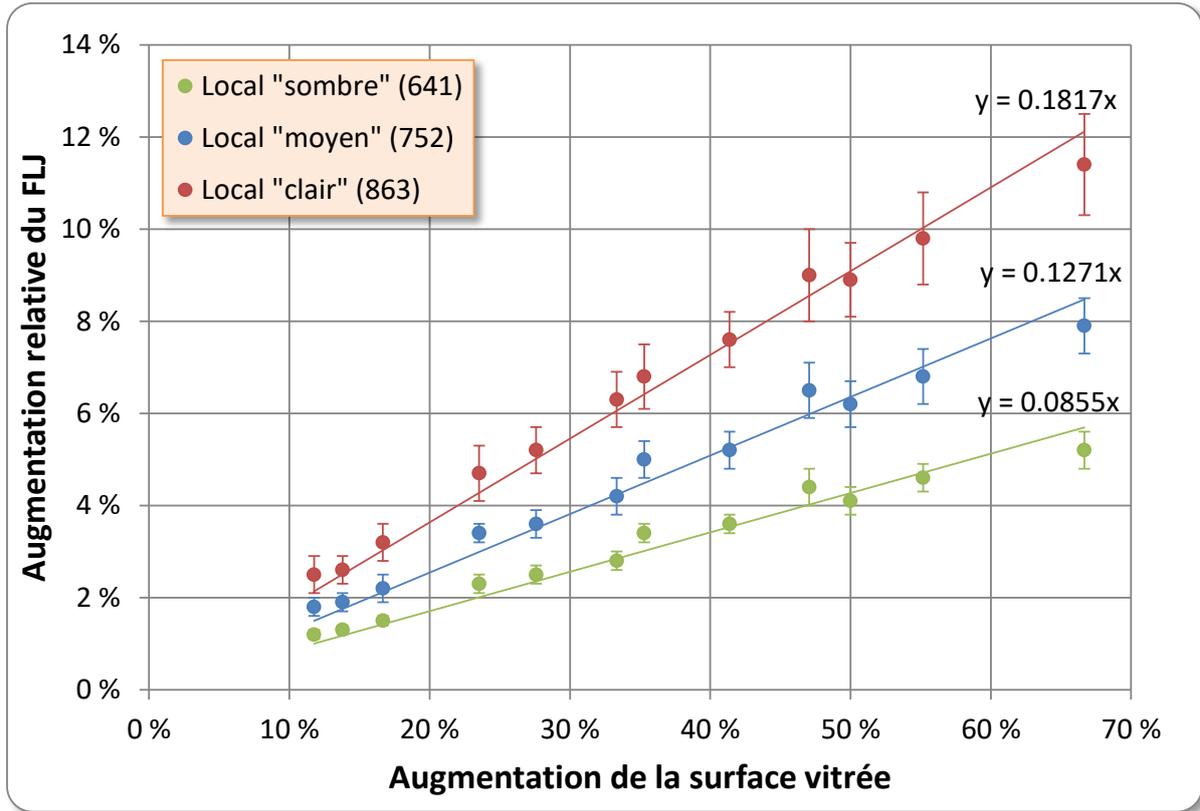


Figure 5 – Relation entre l'augmentation relative du FLJ et l'augmentation relative de la surface vitrée pour trois clartés de local

Si l'on reprend la fenêtre de 1,2 m de hauteur au-dessus du plan utile, on obtient les valeurs du Tableau 10.

Tableau 10 – Augmentation relative du FLJ pour une hauteur de vitrage au-dessus du plan utile de 1,2 m pour trois clartés de local

HAUTEUR D'ALLEGE	HAUTEUR DE VITRAGE EN-DESSOUS DU PLAN UTILE	FACTEURS DE REFLEXION DES PAROIS INTERIEURES		
		641	752	863
0	0,8	5,7 %	8,5 %	12,1 %
0,2	0,6	4,3 %	6,4 %	9,1 %
0,4	0,4	2,9 %	4,2 %	6,1 %
0,6	0,2	1,4 %	2,1 %	3,0 %

Si par une formule ne prenant en compte que la partie haute du vitrage on trouve un FLJ de 4 %, cette valeur devient 4,3 % avec une allège complètement vitrée dans un local 752. Cette différence, qui peut paraître faible, peut être suffisante pour passer d'une classe d'éclairage naturel à une autre ; elle peut aussi avoir une influence non négligeable sur l'autonomie en lumière du jour.

3.3.2 INFLUENCE DE LA CLARTE DU SOL

Les trois configurations comparées correspondent à un facteur de réflexion du sol de 0,1, 0,2 et 0,3. Le facteur de réflexion du plafond est de 0,7 et celui des murs de 0,5.

L'analyse de l'influence du sol se justifie par le fait que la plus grande partie de la lumière qui pénètre par la partie basse du vitrage tombe sur le sol. Les interrétroflexions associées à cette partie de vitrage sont d'abord proportionnels au facteur de réflexion du sol. Les résultats sont illustrés par la Figure 6 sur laquelle les barres d'erreur correspondent à l'écart type.

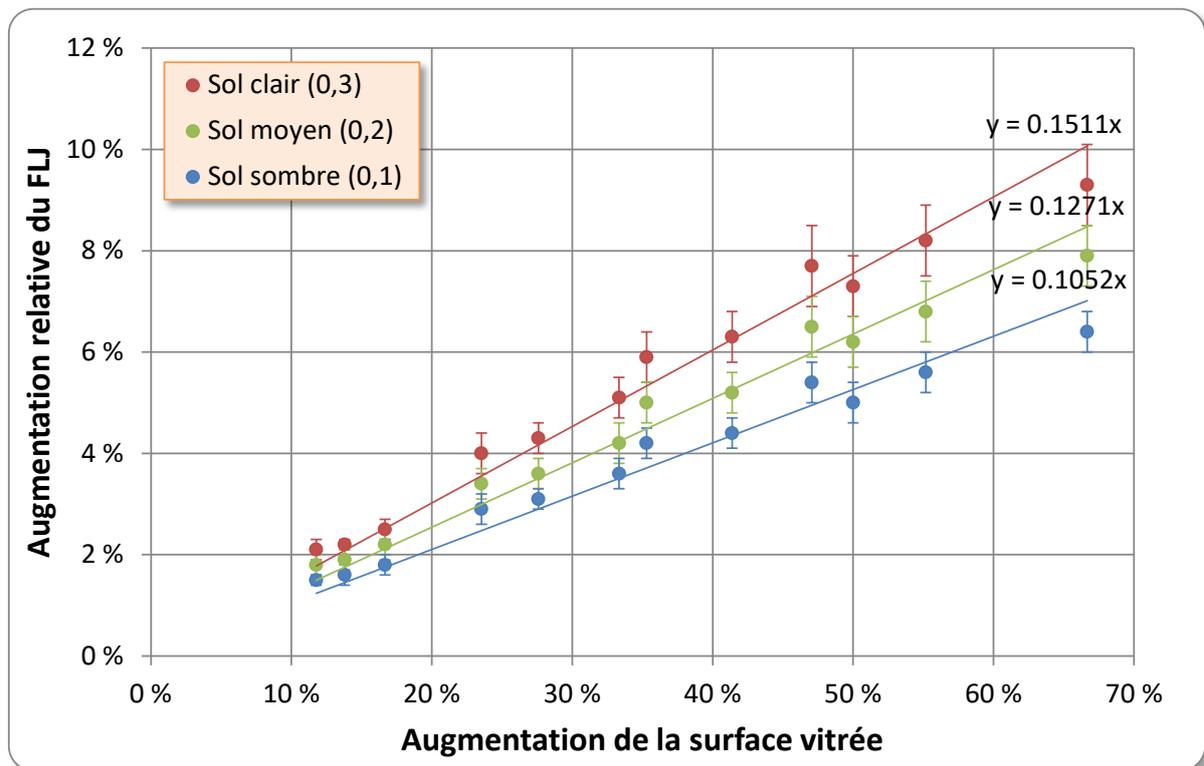


Figure 6 – Relation entre l'augmentation relative du FLJ et l'augmentation relative de la surface vitrée pour trois valeurs de facteur de réflexion du sol

Si, comme pour l'analyse de la clarté du local, l'on reprend la fenêtre de 1,2 m de hauteur au-dessus du plan utile, on obtient les valeurs du Tableau 11.

Tableau 11 – Augmentation relative du FLJ pour une hauteur de vitrage au-dessus du plan utile de 1,2 m pour trois valeurs de facteur de réflexion du sol

HAUTEUR D'ALLEGE	HAUTEUR DE VITRAGE EN-DESSOUS DU PLAN UTILE	FACTEURS DE REFLEXION DES PAROIS INTERIEURES		
		751	752	753
0	0,8	7,0 %	8,5 %	10,1 %
0,2	0,6	5,3 %	6,4 %	7,6 %
0,4	0,4	3,5 %	4,2 %	5,0 %
0,6	0,2	1,8 %	2,1 %	2,5 %

Bien que jouant un rôle prépondérant dans les réflexions de la lumière transmise par la partie basse du vitrage, le facteur de réflexion du sol, toutes choses égales par ailleurs, n'a qu'une très faible influence sur le complément de FLJ apporté par cette partie de vitrage. Si on reprend l'exemple du FLJ de 4 % du paragraphe précédent, la diminution (ou l'augmentation) de 0,1 du facteur de réflexion du sol ne conduit qu'à une augmentation (ou diminution) du FLJ de 0,1 %.

CONCLUSION

La formule proposée pour relier le produit surface vitrée × transmission lumineuse au FLJ atteint sur 80 % de la surface de la zone de premier rang HQE doit être prise comme une première version qui devrait être améliorée en s'appuyant sur des analyses plus complètes. Dans sa forme actuelle elle permet cependant de répondre à l'objectif initial qui était de fournir une solution de dimensionnement rapide des surfaces vitrées en fonction du niveau de performance souhaité. Elle permet aussi de déterminer le FLJ atteint sur 80 % de la surface pour une configuration d'ouverture donnée.

La même démarche pourrait être entreprise pour relier le produit surface vitrée × transmission lumineuse au FLJ moyen sur la zone d'accès à la lumière du jour (formule RT) ou au FLH moyen sur la sur la ligne à mi profondeur de zone bénéficiant de la lumière du jour de la norme EN 15193.

L'influence de l'épaisseur du mur et de l'évasement de la fenêtre peut s'exprimer facilement en se référant à un indicateur géométrique (l'indice de la fenêtre dans le premier cas et le facteur de forme dans le deuxième). Cette influence qui porte sur le flux lumineux rentrant n'est pas forcément exactement la même si on se réfère au flux sur la zone d'accès à la lumière du jour. La différence risque d'être encore plus importante pour estimer l'influence sur le FLJ atteint sur 80 % de la zone de premier rang HQE ou sur le FLJ moyen sur la ligne à mi profondeur de zone bénéficiant de la lumière du jour de la norme EN 15193. On peut noter que cette influence sur le flux rentrant peut également s'appliquer aux apports solaires diffus si on fait l'hypothèse que le ciel est isotrope.

La quantification de l'influence des parties vitrées situées en-dessous du plan utile permet de combler une des lacunes des formules CIBSE et EN 15193. Même

si les valeurs annoncées ne sont que des valeurs moyennes pour de nombreuses configurations de fenêtres et de locaux, elles permettent de savoir s'il est nécessaire de procéder ou non à un calcul "complet" pour savoir si on atteint ou pas un seuil de FLJ donné.

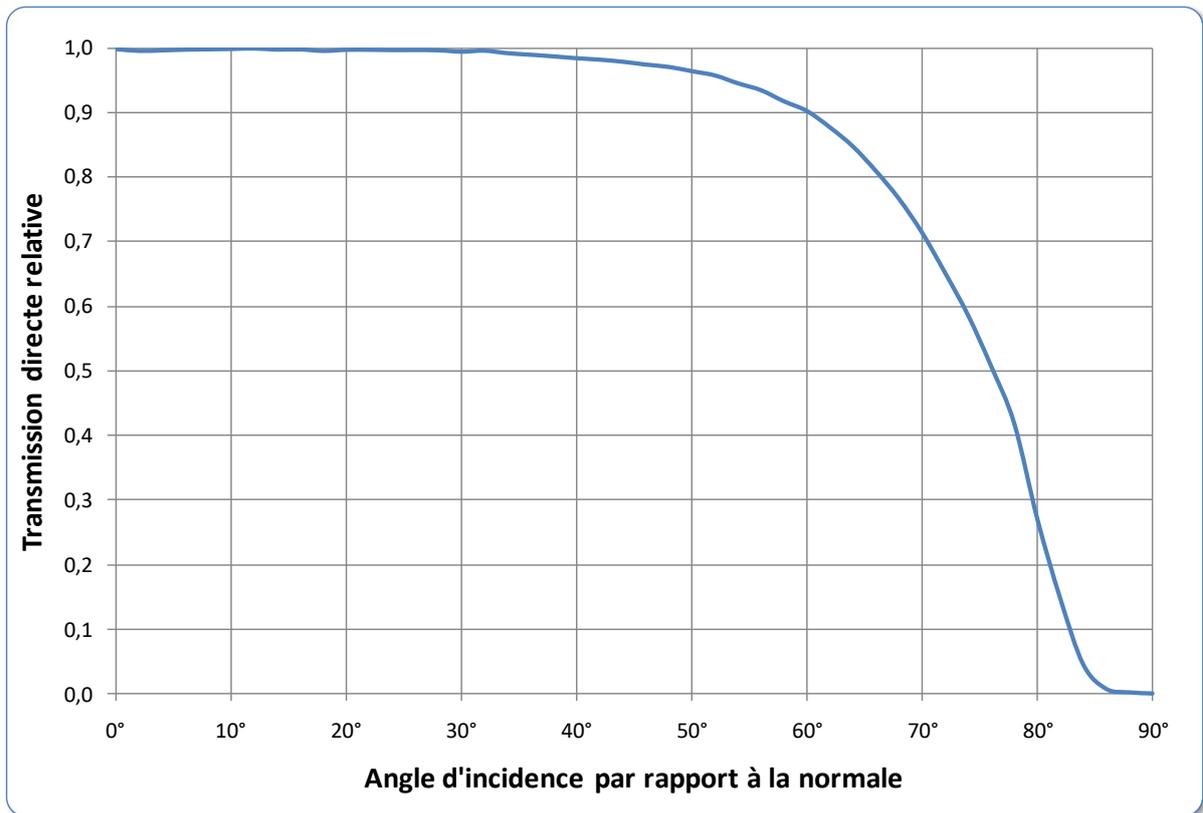
LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] CIBSE, "Applications Manual Window Design", 1987
- [2] CRISP V. H. C and LITTLEFAIR P. J., "Average daylight factor prediction", Proceedings CIBS National Lighting Conference 1984, University of Cambridge, 16-18 April 1984. London, CIBS, (1984)
- [3] LONGMORE J., "Daylighting: a current view", LT Ltg., 68, 113, (1975)
- [4] LYNES J. A., "A sequence for daylighting design", Lighting Research and Technology, 1979, 11 (2) 102-106
- [5] AFNOR, Norme NF EN 15193, "Performance énergétique des bâtiments- Exigences énergétiques pour l'éclairage", (2007), en cours de révision
- [6] AMOURIQ A., "Définition d'un indice de vitrage seuil adapté au niveau de performance souhaité pour la cible HQE n° 10.1", Rapport de stage Polytech Orléans, (2014)

ANNEXES

ANNEXE 1 : COURBE GÉNÉRIQUE DE LA TRANSMISSION LUMINEUSE DU VITRAGE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE

La courbe retenue pour représenter un double vitrage clair générique est la suivante :



ANNEXE 2 : POLYNOMES POUR LE RENDEMENT D'UNE OUVERTURE A EMBRASURE DROITE EN FONCTION DE L'INVERSE DE L'INDICE K DE LA FENETRE

En l'absence de vitrage

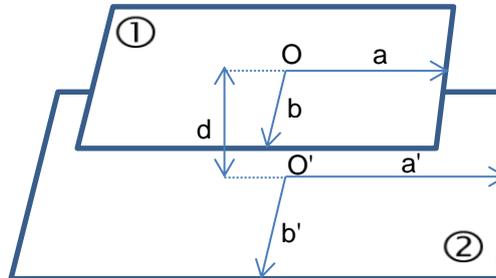
Inclinaison	Type de ciel	Facteur de réflexion	Polynôme (y : rendement de l'ouverture ; x : 1/K)
Verticale 0°	M & S	0,0	$y = 0,0529x^4 - 0,3097x^3 + 0,7724x^2 - 1,1483x + 1$
		0,5	$y = -0,005x^4 - 0,0331x^3 + 0,2942x^2 - 0,7921x + 1$
		0,8	$y = 0,0002x^4 - 0,0378x^3 + 0,2314x^2 - 0,6337x + 1$
	Unif	0,0	$y = 0,0451x^4 - 0,2582x^3 + 0,6447x^2 - 1,0149x + 1$
		0,5	$y = -0,0039x^4 - 0,0181x^3 + 0,2187x^2 - 0,6908x + 1$
		0,8	$y = 0,0034x^4 - 0,0348x^3 + 0,1827x^2 - 0,5565x + 1$
45°	M & S	0,0	$y = 0,0245x^4 - 0,1614x^3 + 0,4673x^2 - 0,8681x + 1$
		0,5	$y = -0,0431x^4 + 0,1435x^3 - 0,0156x^2 - 0,544x + 1$
		0,8	$y = -0,0113x^4 + 0,0294x^3 + 0,0709x^2 - 0,4653x + 1$
	Unif	0,0	$y = 0,0322x^4 - 0,2008x^3 + 0,5377x^2 - 0,9187x + 1$
		0,5	$y = -0,0355x^4 + 0,1063x^3 + 0,0471x^2 - 0,5875x + 1$
		0,8	$y = -0,006x^4 - 0,0017x^3 + 0,1309x^2 - 0,5102x + 1$
Horizontale 90°	M & S	0,0	$y = 0,0286x^4 - 0,1799x^3 + 0,4958x^2 - 0,8878x + 1$
		0,5	$y = -0,0536x^4 + 0,1834x^3 - 0,062x^2 - 0,534x + 1$
		0,8	$y = -0,0057x^4 + 0,0045x^3 + 0,1058x^2 - 0,4863x + 1$
	Unif	0,0	$y = 0,0239x^4 - 0,1857x^3 + 0,5779x^2 - 1,0068x + 1$
		0,5	$y = -0,0539x^4 + 0,1718x^3 + 0,0012x^2 - 0,6233x + 1$
		0,8	$y = -0,023x^4 + 0,0577x^3 + 0,0867x^2 - 0,534x + 1$

En présence de vitrage "relatif"

Inclinaison	Type de ciel	Facteur de réflexion	Polynôme (y : rendement de l'ouverture ; x : 1/K)
Verticale 0°	M & S	0,0	$y = 0,0703x^4 - 0,3512x^3 + 0,7538x^2 - 1,0746x + 1$
		0,5	$y = 0,0482x^4 - 0,2281x^3 + 0,4907x^2 - 0,821x + 1$
		0,8	$y = 0,0603x^4 - 0,2739x^3 + 0,5134x^2 - 0,7254x + 1$
	Unif	0,0	$y = 0,0309x^4 - 0,1723x^3 + 0,4623x^2 - 0,8707x + 1$
		0,5	$y = 0,0134x^4 - 0,0677x^3 + 0,2276x^2 - 0,6382x + 1$
		0,8	$y = 0,028x^4 - 0,1239x^3 + 0,2685x^2 - 0,5594x + 1$
45°	M & S	0,0	$y = -0,0467x^4 + 0,1539x^3 - 0,0057x^2 - 0,6037x + 1$
		0,5	$y = -0,0924x^4 + 0,3625x^3 - 0,3497x^2 - 0,3488x + 1$
		0,8	$y = -0,0759x^4 + 0,2962x^3 - 0,2904x^2 - 0,2874x + 1$
	Unif	0,0	$y = -0,0352x^4 + 0,0979x^3 + 0,0877x^2 - 0,6658x + 1$
		0,5	$y = -0,0848x^4 + 0,3242x^3 - 0,2821x^2 - 0,3976x + 1$
		0,8	$y = -0,0676x^4 + 0,2535x^3 - 0,2156x^2 - 0,3393x + 1$
Horizontale 90°	M & S	0,0	$y = -0,0362x^4 + 0,1093x^3 + 0,0555x^2 - 0,6368x + 1$
		0,5	$y = -0,0922x^4 + 0,3611x^3 - 0,3455x^2 - 0,359x + 1$
		0,8	$y = -0,065x^4 + 0,2519x^3 - 0,2354x^2 - 0,3132x + 1$
	Unif	0,0	$y = 0,0083x^4 - 0,0943x^3 + 0,3885x^2 - 0,8599x + 1$
		0,5	$y = -0,0352x^4 + 0,1164x^3 + 0,017x^2 - 0,5728x + 1$
		0,8	$y = -0,0019x^4 - 0,0124x^3 + 0,1421x^2 - 0,5221x + 1$

ANNEXE 3 : FACTEUR DE FORME ENTRE PERCEMENTS INTERIEUR ET EXTERIEUR D'UNE FENETRE A EMBRASURE EVASEE

Pour deux surfaces rectangulaires planes et parallèles et centrées :



On définit : $X = \frac{a}{d}$ $Y = \frac{b}{d}$ $X' = \frac{a'}{d}$ $Y' = \frac{b'}{d}$

La fonction de base F s'écrit :

$$F(u, v) = u \cdot \sqrt{v^2 + 1} \cdot \operatorname{Arctg} \frac{u}{\sqrt{v^2 + 1}} + v \cdot \sqrt{u^2 + 1} \cdot \operatorname{Arctg} \frac{v}{\sqrt{u^2 + 1}} - \frac{1}{2} \operatorname{Ln}(u^2 + v^2 + 1)$$

La valeur du facteur de forme de ① vers ② s'écrit alors :

$$F_{12} = \frac{1}{2\pi X'Y'} (F(X + X', Y + Y') - F(X + X', Y - Y') - F(X - X', Y + Y') + F(X - X', Y - Y'))$$

ANNEXE 4 : POLYNOMES POUR LE RENDEMENT D'UNE OUVERTURE A EMBRASURE EVASEE EN FONCTION DU FACTEUR DE FORME DE LA FENETRE

Inclinaison	Évasement	Facteur de réflexion	Polynôme (y : rendement de l'ouverture ; x : facteur de forme)
Verticale 0°	0°	0	$y = 0,0445x^3 - 0,0709x^2 + 1,0205x$
		0,5	$y = 0,2263x^3 - 0,6949x^2 + 1,4713x$
		0,8	$y = 0,9135x^3 - 2,0135x^2 + 2,12x$
	15°	0	$y = 0,0552x^3 - 0,0975x^2 + 1,0353x$
		0,5	$y = 0,1806x^3 - 0,6865x^2 + 1,5041x$
		0,8	$y = 0,8465x^3 - 2,0387x^2 + 2,2001x$
	30°	0	$y = 0,0586x^3 - 0,112x^2 + 1,0455x$
		0,5	$y = 0,1203x^3 - 0,6205x^2 + 1,4972x$
		0,8	$y = 0,6581x^3 - 1,8115x^2 + 2,1547x$
	45°	0	$y = 0,0405x^3 - 0,0956x^2 + 1,045x$
		0,5	$y = 0,072x^3 - 0,5509x^2 + 1,4747x$
		0,8	$y = 0,5809x^3 - 1,7001x^2 + 2,1203x$
45°	0°	0	$y = 0,1806x^3 - 0,3894x^2 + 1,2111x$
		0,5	$y = 0,3279x^3 - 0,9228x^2 + 1,6101x$
		0,8	$y = 1,0445x^3 - 2,2518x^2 + 2,2393x$
	15°	0	$y = 0,2634x^3 - 0,548x^2 + 1,2884x$
		0,5	$y = 0,3315x^3 - 1,0111x^2 + 1,6924x$
		0,8	$y = 1,0546x^3 - 2,4216x^2 + 2,3888x$
	30°	0	$y = 0,2824x^3 - 0,6087x^2 + 1,3275x$
		0,5	$y = 0,3525x^3 - 1,0926x^2 + 1,7545x$
		0,8	$y = 0,8758x^3 - 2,2388x^2 + 2,3765x$
	45°	0	$y = 0,2938x^3 - 0,668x^2 + 1,369x$
		0,5	$y = 0,3304x^3 - 1,1063x^2 + 1,7853x$
		0,8	$y = 0,8217x^3 - 2,1958x^2 + 2,3834x$
Horizontale 90°	0°	0	$y = 0,1116x^3 - 0,119x^2 + 1,0134x$
		0,5	$y = 0,1502x^3 - 0,5364x^2 + 1,3992x$
		0,8	$y = 0,9302x^3 - 1,9875x^2 + 2,0893x$
	15°	0	$y = 0,0779x^3 - 0,069x^2 + 0,995x$
		0,5	$y = 0,0323x^3 - 0,3919x^2 + 1,3686x$
		0,8	$y = 0,7619x^3 - 1,8518x^2 + 2,1062x$
	30°	0	$y = 0,0975x^3 - 0,0985x^2 + 1,0037x$
		0,5	$y = 0,0234x^3 - 0,3984x^2 + 1,3842x$
		0,8	$y = 0,5818x^3 - 1,6293x^2 + 2,0573x$
	45°	0	$y = 0,133x^3 - 0,1661x^2 + 1,0313x$
		0,5	$y = -0,0141x^3 - 0,3524x^2 + 1,3707x$
		0,8	$y = 0,597x^3 - 1,673x^2 + 2,0833x$

SIEGE SOCIAL

84, AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2
TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX (33) 01 60 05 70 37 | www.cstb.fr

CSTB
le futur en construction

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT | MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS