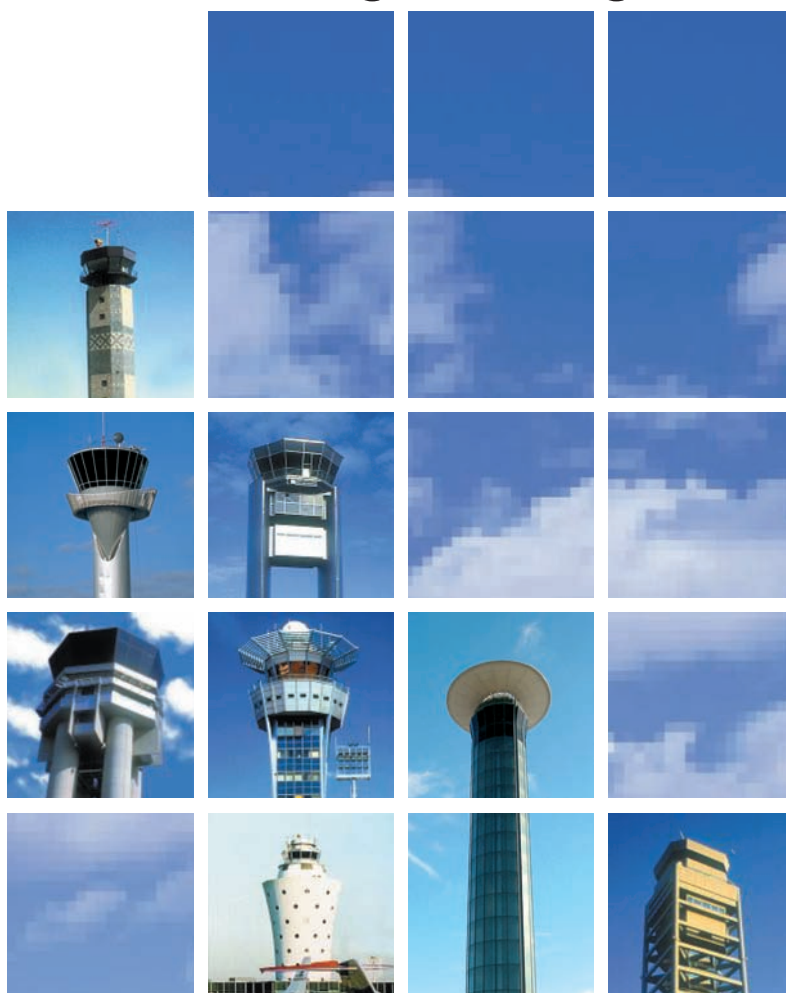


Les tours de contrôle

Fascicule 4 Les vitrages de vigie





Sommaire

Le présent fascicule a pour objet de présenter les spécificités des vitrages de vigie, et de souligner les points fondamentaux à respecter en la matière.

Fascicule 4

Les vitrages de vigie

Préambule	6
Les exigences spécifiques	10
Les caractéristiques des vitrages de vigie	13
Les préconisations actuelles et les évolutions envisageables	19
Conclusion	23
Annexe 1 Glossaire	24
Annexe 2 Choix de la teinte des vitrages	26



Préambule



1 L'œil de l'aérodrome

L'importance des vitrages pour une visibilité optimale

La vigie d'une tour de contrôle est souvent présentée comme « l'œil de l'aéroport ». Cette image, bien que naïve, est pourtant assez juste, car même si la part de contrôle effectuée aux instruments (donc sans visibilité) est très importante, l'équipement électronique n'a pu se substituer à l'œil humain.

Rappelons que les deux premiers niveaux de contrôle, le contrôle en route et le contrôle d'approche, s'exercent uniquement aux instruments, sans aucune visibilité, mais qu'ils ne concernent que des trajectoires aériennes à très haute altitude, en conservant des distances de séparation très grandes entre les aéronefs.

En revanche, le dernier niveau du contrôle aérien, qui s'exerce dans la tour de contrôle, appelé contrôle d'aéroport, bien que faisant

Une visibilité optimale depuis la vigie est une exigence fondamentale du contrôle d'aérodrome. La nature et la qualité du vitrage utilisé sont donc primordiales.

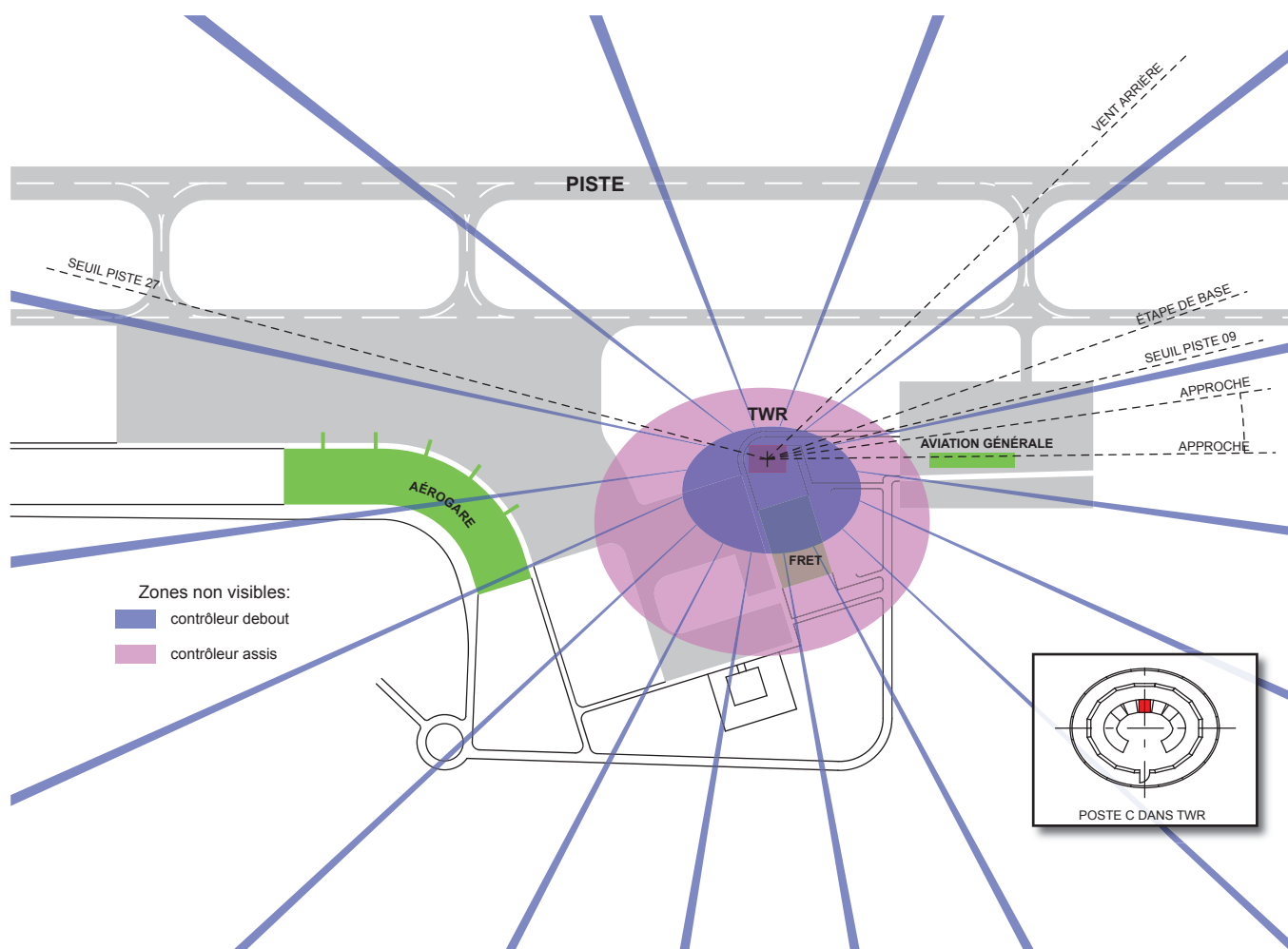
également appel aux instruments, s'exerce en grande partie « à vue ».

Les grands aéroports sont équipés de façon à pouvoir exercer également ce type de contrôle sans visibilité, en cas de très mauvaise condition météorologique par exemple ; mais ce genre de situation, en condition « dégradée », n'est pas représentative du travail de contrôle exercé habituellement en vigie, où une bonne visibilité est indispensable.

En effet, par rapport aux phases de contrôle « en route » et « d'approche », la densité des aéronefs à contrôler augmente dans l'espace relativement restreint des abords d'un aérodrome où ils convergent. Leurs distances intermédiaires diminuent (effet « d'entonnoir »), alors même que, par ailleurs, les faibles altitudes obligent à prendre en compte également le relief environnant, les constructions, etc.

Dans de telles conditions, les instruments ne remplacent pas l'observation visuelle directe, qui seule permet, par une perception globale et quasi instantanée d'une situation qui « bouge » très rapidement, de réagir opportunément « en temps réel ». L'idéal serait donc d'avoir une visibilité totale c'est-à-dire une vigie totalement transparente, et aucun « masque » extérieur.

Épure de visibilité



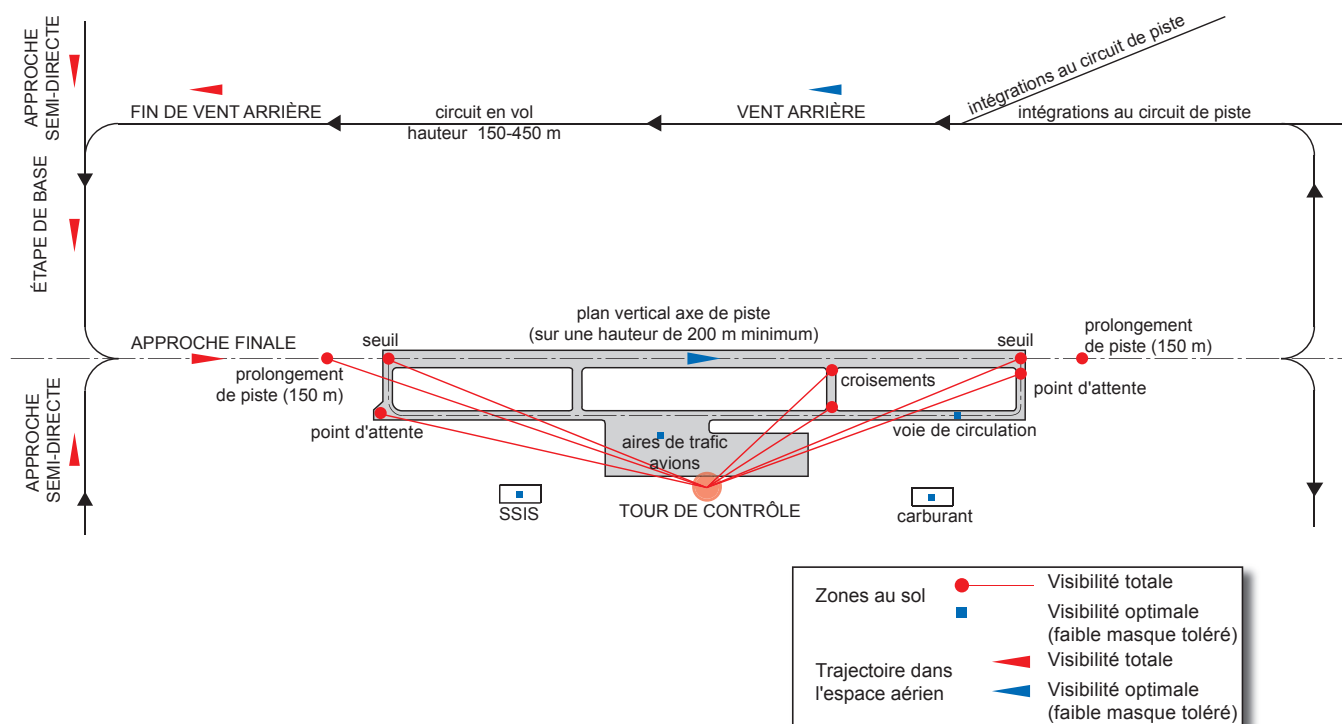
Dans la pratique, l'affranchissement des « masques » extérieurs (reliefs ou constructions) est effectué « en amont », par un positionnement judicieux de la tour de contrôle, et grâce à une hauteur suffisante (cf. fascicule 2 : localisation et hauteur).

Cependant, même lorsque ce premier problème a été résolu, il reste celui des « masques »

que l'on pourrait appeler « structurels », c'est-à-dire engendrés par la structure même de la vigie : le toit, les poteaux et les montants des vitrages, les allèges, le balcon extérieur et son garde-corps, voire les pupitres de contrôle eux-mêmes.

Ainsi qu'il a été exposé dans le fascicule II (localisation et hauteur), un certain nombre

Plan des zones et trajectoires à voir depuis la vigie



de secteurs « sensibles », tel que par exemple : les seuils de piste et leurs prolongements, les points d'arrêt, les croisements, etc. (cf. plan des zones à voir), doivent pouvoir être perçus totalement, sans le moindre « masque », par les contrôleurs. Cela signifie, en particulier, qu'aucun poteau de la vigie ne doit occulter, fut-ce partiellement, ces zones dites « de visibilité totale ».

Pour des raisons pratiques de faisabilité technique, il n'est pas possible de formuler une exigence aussi restrictive pour la totalité des aires à surveiller, telle que, par exemple, la piste sur toute sa longueur où, en général, nous devons tolérer la présence de poteaux ou de montants de vitrages.

Néanmoins si l'on ne peut obtenir une visibilité totale, il faut minimiser la gêne occasionnée en jouant sur le nombre de poteaux, leur répartition et leur section.

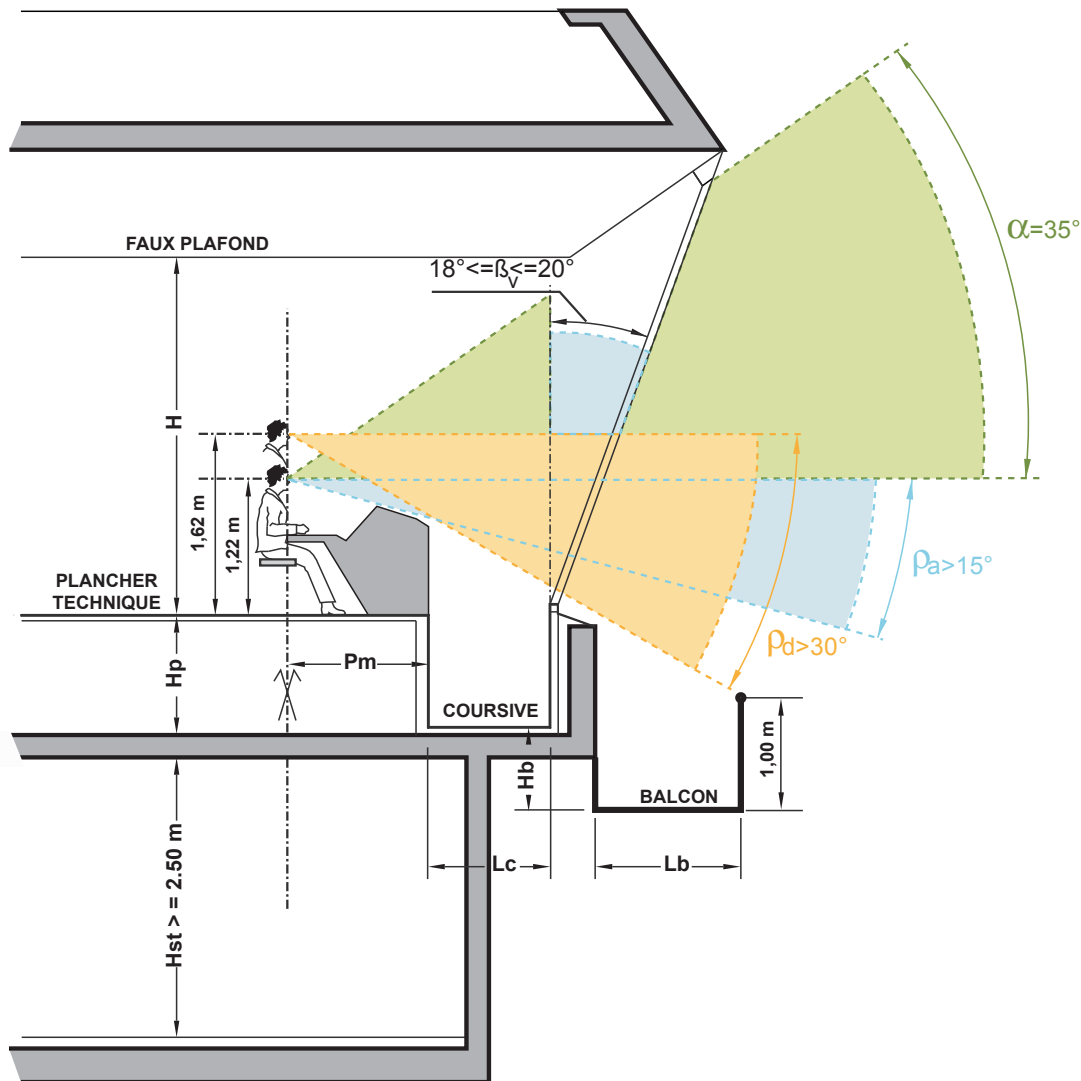
C'est pourquoi nous utilisons le terme de visibilité optimale.

Certains secteurs « sensibles » doivent pouvoir être perçus en totalité.

Le fascicule précédent (l'espace intérieur) exposait, en particulier, le principe de coupe d'une vigie, qui permet, grâce à l'agencement respectif du podium, des pupitres de contrôle, de la coursive et du balcon, ainsi que par une hauteur suffisante du toit, d'atteindre des angles suffisants de visibilité vers le bas comme vers le haut.

Or, afin de pouvoir contrôler dans de bonnes conditions les tours de piste ou les phases d'approche par exemple (visibilité vers le haut), il est fortement déconseillé de mettre en place une lisse horizontale, qui « couperait » la vision. Il est nettement préférable de disposer des vitrages d'un seul tenant sur toute la hauteur nécessaire à l'obtention des angles de visibilité minimum vers le haut et vers le bas, ce qui implique des longueurs importantes (de l'ordre de 4 mètres). En résumé, les conditions de visibilité depuis la vigie sont absolument fondamentales pour l'exercice du contrôle d'aérodrome, et pour

Coupe type d'une vigie



garantir de bonnes conditions de sécurité du trafic aérien évoluant aux abords de l'aérodrome, mais aussi de la circulation au sol des aéronefs ou autres véhicules. Cela suppose évidemment la mise en œuvre de vitrages présentant de très bonnes qualités de transparence (ce qui exclut les gammes de produits trop réfléchissants, trop colorés ou trop déformants).

Les angles de visibilité verticaux imposent des vitrages de grandes dimensions.

Mais cela suppose également, afin d'obtenir des angles de visibilité verticaux suffisants et de ne pas multiplier les poteaux gênants, de grandes dimensions de vitrages inhabituelles par rapport à ceux des bâtiments classiques ; ce qui entraîne des conséquences au niveau thermique et même en matière de transparence.



Les exigences spécifiques aux vitrages de vigie



2 Une bonne visibilité - BORDEAUX-MERIGNAC

Les exigences auxquelles doivent répondre les vitrages mis en œuvre en vigie sont multiples. C'est pourquoi il est très important de ne retenir, parmi la gamme très étendue de produits verriers existants que ceux dont les caractéristiques répondent à l'ensemble des exigences présentées ci-après.

Les exigences sont de différente nature :

- visuelles
- mécaniques
- acoustiques
- thermiques et solaires.

Les vitrages de vigies doivent répondre à des exigences très spécifiques.

La bonne perception visuelle est un objectif fondamental, qui se traduit par une série d'exigences particulières.

Les exigences de visibilité

Les vitrages doivent, ainsi qu'il a été exposé dans le chapitre précédent, présenter des dimensions assez importantes pour offrir des angles de visibilité verticaux suffisants (de l'ordre de 35° vers le haut et 15° vers le bas pour un contrôleur en position assise, et de 30° vers le bas en position debout) et limiter le nombre de « masques ».

Par ailleurs, la nature et la qualité des vitrages utilisés doivent offrir une parfaite transparence et un bon « rendu » d'image.

Les vitrages réuniront donc les conditions suivantes :

- grandes dimensions (de l'ordre de 3 m à 4 m, voire 5 m de hauteur pour l'obtention d'angles de visibilité verticaux suffisants),
- reflets intérieurs les plus faibles possibles,
- absence d'effet de distorsion,
- pas d'effet « d'image multiple »,
- limitation de la gêne solaire,
- transmission lumineuse compatible avec les visions diurnes et nocturnes,
- rendu des couleurs satisfaisant,
- limitation du ruissellement d'eau de pluie (inclinaison des vitrages).

Les exigences mécaniques et de sécurité

La résistance mécanique des vitrages mis en œuvre dans une vigie doit répondre à deux objectifs :

- résistances aux contraintes dues au vent,
- respect des normes de sécurité anti-chutes et anti-chocs.

Il faut attirer l'attention sur le fait que, en ce qui concerne le calcul des épaisseurs nécessaires pour une résistance suffisante, il est nécessaire d'intégrer les majorations suivantes :

- coefficient de majoration (variable selon la hauteur, dans l'application des règles neige et vent),
- prise en compte d'une inclinaison des vitrages (entre 18 et 20°).

Il est nécessaire de prendre en compte les hauteurs importantes des tours de contrôle et les inclinaisons des vitrages dans l'application des exigences mécaniques et des règles de sécurité.

Le travail en vigie suppose une isolation acoustique maximale. Ce critère est donc très important, et peut-être déterminant, dans le choix du produit verrier à mettre en œuvre en fonction de l'environnement acoustique de la tour.

Les exigences acoustiques

Une bonne intelligibilité des conversations est indispensable au travail pour une bonne et rapide compréhension des messages échangés (notamment la radio).

Cela suppose d'une part une limitation de la durée de réverbération T_r (inférieure à 0,7

seconde sur toutes les gammes de fréquences audibles), et d'autre part une limitation du niveau sonore (objectifs : bruit de fond inférieur à 45 dBA, pointes maximales limitées à 63 dBA).

Ces exigences ont été présentées en détail dans le fascicule 3 (exigences qualitatives).

Or ces exigences sont particulièrement difficiles à obtenir avec des surfaces vitrées aussi importantes que celles rencontrées dans une vigie, qui constituent un véritable « maillon faible » de ce point de vue.

En ce qui concerne les phénomènes de réverbération, que les surfaces vitrées (non absorbantes acoustiquement) ont tendance à accentuer, on peut les minimiser en évitant les faces parallèles. L'inclinaison des vitrages y contribue, et c'est l'une des raisons pour lesquelles (avec les problèmes de reflets) les formes carrées ou rectangulaires sont déconseillées pour les vigies. L'isolation acoustique d'un vitrage feuilleté constitué de deux feuilles de verres assemblées par un intercalaire de Poly Vinyl Butyral (PVB), dépend, bien entendu, des épaisseurs mises en œuvre, mais présente un indice d'affaiblissement acoustique R_w de l'ordre de 35 à 38 dB, ce qui est parfois insuffisant dans une zone aéroportuaire.

Pour obtenir un indice d'affaiblissement dépassant 40 dB, il faut mettre en œuvre un



3 Une isolation acoustique suffisante - LYON-SAINT-EXUPERY

intercalaire de PVB acoustique, qui permet d'atteindre des valeurs de l'ordre de 42 dBA. Dans les cas (peu courants) où il apparaîtrait fortement souhaitable d'obtenir une isolation encore plus importante pour des raisons de sécurité (intelligibilité des messages oraux), il peut être envisagé de mettre en œuvre un double vitrage mais cela comporte d'autres inconvénients : risque de dédoublement d'images, et d'opacification à long terme par pénétration d'impuretés dans les interstices. Toutefois, ce problème de durabilité (qui a conduit à déconseiller l'utilisation de doubles vitrages en vigie pendant très longtemps) apparaît aujourd'hui résolu, par une étanchéité maîtrisée. Par ailleurs, des couches anti-reflets peuvent être mises en œuvre en cas de besoin (les problèmes de reflet ont été fortement minimisés par rapport aux anciennes règles grâce à l'inclinaison des vitrages). Ces progrès techniques peuvent rendre ce produit à nouveau intéressant (cf. chapitre Innovations).

Les vitrages de vigie sont teintés dans la masse, de couleur verte de préférence : (cf. chapitre « couleur des vitrages ») pour limiter les effets du rayonnement solaire direct. Par fort ensoleillement, un dispositif complémentaire d'occultation par des stores et/ou d'atténuation par films de protection solaire est alors déployé.

Les exigences thermiques et solaires

Les vitrages utilisés doivent résister aux effets de dilatations thermiques, encore accrus du fait de la teinte des vitrages et de leurs grandes dimensions.

Par ailleurs, il convient d'être particulièrement vigilant concernant les risques de choc thermique, qui peuvent par exemple être induits par le soufflage d'air froid d'une climatisation mal orientée. Le vitrage trempé offre de meilleures garanties face à un tel risque, puisqu'il peut résister à un différentiel de température de 200 °C, contre 30 °C pour



4 Prise en compte des effets de la température et de la lumière solaire - PARIS-CHARLES-DE-GAULLE

La prise en compte des phénomènes de dilatation thermique est fondamentale dans le choix de la nature des vitrages de vigie, surtout compte tenu de leurs dimensions inhabituelles. Par ailleurs les vitrages sont teintés dans la masse, toutefois il est nécessaire de prévoir des dispositifs complémentaires de protection solaire.

le verre recuit, et 100 °C pour le verre durci (cf. glossaire en annexe).

Toutefois, les logiciels de modélisation, notamment des effets thermiques, ont beaucoup évolués ces dernières années, et permettent une approche beaucoup plus précise qu'auparavant. C'est pourquoi, après une longue période d'utilisation quasi-exclusive de vitrages trempés, il apparaît possible, dans certaines conditions, d'utiliser de simples vitrages « recuits » (mais feuilletés) à condition d'avoir procédé aux vérifications nécessaires par rapport au risque de choc thermique, notamment au regard des dispositions retenues en matière de chauffage/climatisation.

L'utilisation de couche de basse émissivité et de double-vitrage (cf. chapitre : « innovation ») qui constituent une plus value importante à l'investissement, peut permettre sur un long terme, des économies importantes de dépenses de chauffage, celle d'une couche de protection ou de contrôle solaire (qui peut, ou non, selon sa nature, être combinée avec une basse émissivité) permet d'économiser la climatisation.

En effet, de par la prépondérance du vitrage dans son enveloppe, la vigie s'apparente à une véritable serre, alors que par ailleurs, le travail de contrôleur nécessitant une attention soutenue et sans faille. Il est donc indispensable de mettre en œuvre une installation chauffage/climatisation suffisamment puissante.



Les caractéristiques des vitrages de vigie

Les exigences spécifiques auxquelles doivent répondre les vitrages de vigie conduisent aux valeurs caractéristiques ci-après, ainsi qu'à un certain nombre de particularités.

Les valeurs de coefficients caractéristiques :

Les objectifs de bonne visibilité et de limitation des effets de rayonnement solaire conduisent, pour les valeurs caractéristiques, aux ordres de grandeur suivants :

- indice de rendu de couleurs supérieures à 75 %,
- transmission lumineuse entre 60 et 70 %,
- coefficients énergétiques $\leq$ ou = 30 %,
- facteur solaire $\leq$ ou = 45 %.

Les reflets doivent être aussi réduits que possible : en tout cas inférieurs à 10 % pour les reflets intérieurs.

Mais les reflets externes doivent être également limités, à cause du risque d'éblouissement qui pourrait gêner le trafic environnant. L'isolation acoustique doit être également la plus élevée possible, compte tenu des possibilités offertes par la technique utilisée.

La sécurité aux chutes et aux heurts

La résistance mécanique des vitrages doit être suffisante pour résister à des efforts au vent très importants, compte tenu de la grandeur de leurs surfaces, qui sont de plus généralement majorées par un coefficient de hauteur. Par ailleurs, les vitrages de vigie doivent vérifier les normes de résistance aux heurts, aux chutes dans le vide et aux chutes de verre, telle qu'elles sont définies dans le Document Technique Unifié (DTU 39). Compte tenu des dimensions de ces vitrages et de leur disposition en hauteur, généralement surplombant le vide, il convient d'être particulièrement vigilant sur cet aspect. Plus précisément, ces protections sont de plusieurs natures :

Les exigences spécifiques aux vitrages de vigie se traduisent par un ensemble de valeurs des coefficients caractéristiques.

Il est impératif de s'assurer que les règles de sécurité concernant les risques de chutes ou de heurts sont respectées.

- protection des personnes en cas de heurt (éviter les risques de blessures par coupure en cas de heurt accidentel),
- protection contre la chute des personnes (empêcher la chute des personnes dans le vide lorsque la hauteur de chute est supérieure à 1 mètre),
- protection contre la chute d'objets (garantir la sécurité des passants en pied de tour contre une éventuelle chute d'objet consécutive à un bris de verre, mais aussi contre les risques de blessures engendrés par la chute de morceaux de bris de verre).

Concernant ce dernier point (risque de chute de bris de verre), l'usage de vitrages feuilletés permet, en cas de bris accidentel du vitrage, d'empêcher la chute des morceaux, puisque ceux-ci restent collés sur la couche de Poly Vinyle Butyral (PVB).

La réglementation (DTU 39) impose généralement dans le cas de vitrages inclinés le recours à des vitrages feuilletés.

L'usage de vitrages monolithiques simplement recuits (cf. glossaire en annexe), déjà fortement déconseillé pour des raisons de résistance thermique et mécanique face au vent, est proscrit du point de vue des règles de sécurité aux chutes et aux heurts, du fait de son comportement en cas de bris casse en grands morceaux coupants sauf s'il est feuilleté).



5 Les vitrages de la vigie doivent respecter les exigences de sécurité face aux risques de chute et de heurt - PARIS-CHARLES-DE-GAULLE

Il est possible néanmoins de recourir à un vitrage monolithique trempé (dans les rares cas où les épaisseurs sont relativement faibles) à condition, selon la réglementation, de mettre en œuvre « des éléments s'opposant à la chute de fragments de verre en cas de bris accidentel de vitrage ».

Le vitrage trempé thermiquement présente la particularité de se morceler en très petits morceaux de verre en cas de bris.

Selon les recommandations relatives aux façades légères, les « éléments s'opposant à la chute » doivent constituer un auvent d'une largeur suffisante (égale au $1/20^{\text{e}}$ de la hauteur la séparant du bord supérieur du vitrage, plus 1,40 m, sans être inférieure à 1,50 m si la hauteur totale de l'ensemble est supérieure à 28 m).

Dans tous les cas de figure, il faudra garantir une protection résiduelle, au moins équivalente à la protection réalisée par une lisse supérieure, une lisse médiane et une lisse basse. Dans le cas d'un vitrage monolithique, celui-ci devra nécessairement être trempé.

Le vitrage dit « durci », appelé également « semi-trempé », a subi un traitement comparable à celle de la trempe thermique, mais présente des résistances moins grandes que le « trempé ». Ceci peut être compensé par des épaisseurs plus importantes, mais, du point de vue normatif, le semi-trempé thermique est limité, pour des raisons de fabrication, à 10 mm.

De même, afin d'atteindre des résistances comparables au trempé avec du simple « recuit », il est possible d'augmenter les épaisseurs, mais cela n'est pas suffisant. Une solution feuilletée, obtenue en collant 2 lames de verre, voire plus (solution dite « multi-feuilletée », assemblant 3 ou 4 verres), permet d'augmenter la résistance mécanique mais dans des proportions limitées (à titre indicatif, un assemblage 10 mm + 10 mm a une résistance équivalente à 12 mm monolithique).

Les vitrages « durcis » et « recuits » n'offrent pas les mêmes garanties mécaniques que le trempé et présentent des risques de brisure par choc thermique (voir page 12).

Les considérations ci-dessus conduisent généralement au choix d'un vitrage trempé et feuilleté.

L'inclination des vitrages (et la valeur de l'angle d'inclinaison) résulte d'un ensemble de raisons multiples.



6 Les vitrages des vigies doivent être inclinés de 18° à 20° - BREST-GUIPAVAS

Dans la grande majorité des cas, les épaisseurs à mettre en œuvre nécessitent l'usage d'un vitrage feuilleté et dans ce cas, le film PVB assure la protection résiduelle. Ces vitrages feuilletés résultent de l'assemblage par collage de lames de verres. Celles-ci peuvent être soit trempées toutes les deux, soit durcies et trempées, voire simplement recuites à condition de procéder à toutes les vérifications nécessaires (résistance mécanique, dilatation et choc thermique !...).

Lorsque le vitrage doit remplir une fonction de protection contre la chute des personnes dans le vide il doit présenter des épaisseurs suffisantes pour pouvoir résister aux essais prévus par les normes (NF P 08-301 et P 08-302 : chutes de sacs de 50 mètres, projections de billes d'acier de 1kg tombant de 1 mètre).

Il conviendra d'être particulièrement vigilant sur la prise en compte, dans le calcul de ces épaisseurs, des dimensions importantes offrant une grande prise au vent, dont l'effet est encore majoré par un coefficient au-delà d'une certaine hauteur. Enfin, le calcul conduit à des épaisseurs encore accrues par le fait que les vitrages sont nécessairement inclinés (généralement entre 18° et 20°) pour les raisons exposées ci-après.

L'inclinaison des vitrages

Les vitrages de vigie sont inclinés vers l'extérieur, de 18° à 20° . Les raisons de cette inclinaison sont multiples :

- limiter les effets gênants de ruissellements d'eau de pluie,
- éviter les problèmes engendrés par les reflets internes, notamment les effets « miroirs », particulièrement gênant la nuit en reflétant l'intérieur de la vigie,
- éviter les effets externes pouvant éblouir les pilotes ou le personnel extérieur, en renvoyant vers le sol la majorité des rayons solaires réfléchis,
- éviter les effets acoustiques entraînés par des parois parallèles,
- réduire l'impact thermique du rayonnement solaire en augmentant l'angle d'incidence des rayons.

La valeur de l'inclinaison (entre 18° et 20°) résulte, d'un compromis entre ces objectifs et l'expérience :

- une valeur plus petite (10° étant le minimum absolu pour éviter la stagnation de gouttes d'eau), se révèle moins efficace vis-à-vis des problèmes de pluie,

La limitation des « masques » induits par les poteaux, et l'obtention d'angles de visibilité suffisants (vers le haut et le bas) conduisent à des vitrages de très grandes dimensions.



7 L'importance des angles de visibilité conduit à des vitrages de très grandes dimensions

- une valeur plus grande aurait l'avantage d'augmenter encore l'angle d'incidence du rayonnement solaire et minimiser ainsi son effet, mais elle augmenterait le volume de la vigie à climatiser, ainsi que les difficultés constructives.

La dimension des vitrages

Une grande particularité qui singularise les vitrages de vigie est leur dimension très grande (de l'ordre de 3,50 m à 4 m, voire plus), qui résulte comme on vient de l'exposer, des exigences de visibilité.

Les conséquences de ces grandes dimensions sont de plusieurs ordres, notamment économiques et concernent la nature du produit verrier utilisé. Les prix, rapportés au mètre carré, des vitrages de vigie, sont beaucoup plus importants que ceux utilisés couramment dans des bâtiments plus « classiques ». En effet, dans un cas, il s'agit de produits verriers issus de production à grande échelle, tandis que dans d'autre, il s'agit de séries limitées.

Le vitrage utilisé est le plus souvent trempé. Or, la trempe chimique n'est pas possible au-delà de dimensions de l'ordre de 3 mètres. Le procédé utilisé est donc celui de la trempe thermique (cf. ci-après).

Le nombre d'usines de trempage disposant de fours de trempage suffisamment grands est limité.

Au-delà de certaine dimension, il peut-être nécessaire de recourir à des usines situées à l'étranger, ce qui majore encore le surcoût. La plus grande dimension des vitrages pouvant être trempée dans un four de trempage sur le territoire français est actuellement limitée : entre 4,5 m et 4,7 m en longueur, et entre 2,2 m et 2,4 m en largeur (selon les fabricants). Exceptionnellement il est possible d'atteindre jusqu'à 6 m de longueur, mais avec une largeur inférieure à 2,14 m.

La teinte des vitrages et les dispositifs de protection solaire

Les choix de la teinte des vitrages et celui des dispositifs de protection solaire sont faits de manière complémentaire, de façon à conserver les meilleures conditions de visibilité extérieure possibles, malgré les variations de la luminosité naturelle.

Le principe consiste à mettre en œuvre des vitrages suffisamment teintés pour assurer une protection solaire permanente, mais tout en conservant une transparence suffisante, même par temps couvert ou en condition de pénombre.

La couleur des vitrages :

Les vitrages de vigie sont teintés en vert, parfois en bronze ou en gris.

Le choix de la couleur à retenir de préférence dépend de plusieurs paramètres. Ainsi par exemple, la luminosité moyenne naturelle plus ou moins prononcée, la présence (ou non) de stores ou de films de protection solaire, la présence (ou non) de trafic nocturne, peuvent conduire à retenir une teinte plus ou moins sombre.

En fonction de ces conditions, la teinte retenue aura des effets différents en matière de rendu des couleurs, ou de sensibilité photométrique, dans les conditions diurne et nocturne.

Si l'on prend en compte par exemple le coefficient R_a de rendu des couleurs (dont la valeur minimum exigée pour une vigie est de 90 %), la couleur bronze présente la valeur la plus importante (94 %), à comparer à celle du vert par exemple, de 90 %.

La couleur verte représente le meilleur compromis, vis-à-vis de la réponse physiologique de l'œil, par rapport aux visions diurne et nocturne (cf. annexe ci-jointe : étude menée par le STAC avec le CSTB sur le choix de la teinte des verres).

En effet, les cellules sollicitées dans la rétine lors de la perception visuelle sont de deux types :

- les cônes, qui ont une réponse à la fois pho-



8 La couleur des vitrages de vigie doit permettre de conserver une bonne vitalité par toutes sortes de conditions extérieures, tant diurnes que nocturnes - PARIS-CHARLES-DE-GAULLE

Le choix de la couleur des vitrages de vigie (vert, bronze ou gris) est orienté par différents paramètres, tels que le type de protection solaire utilisée en complément (stores, films de protection).

La couleur verte est généralement préconisée, car elle représente un bon compromis, notamment par rapport à la réponse physiologique de l'œil vis-à-vis des visions diurnes et nocturne.

tométrique et chromatique, permettent de percevoir les couleurs ; ils se répartissent en trois catégories, présentant un maximum d'absorption pour l'une des trois couleurs : bleu, vert et rouge,

- les bâtonnets, à l'origine de la vision nocturne, qui ne permettent pas de percevoir les couleurs (réponse uniquement photométrique) ; et dont la sensibilité spectrale est centrée autour d'un « pic » maximum pour 510 nm.

Ainsi qu'il apparaît dans l'étude précitée jointe en annexe, la couleur verte est la mieux « centrée » vis-à-vis du maximum de sensibilité de la vision nocturne et de la visibilité chromatique moyenne.

Ce point confirme les préconisations antérieures du service technique des bases aériennes (STAC) en faveur de la couleur verte.

Les protections solaires :

Les protections solaires utilisées dans les vigies aéroportuaires sont généralement de deux types, aux usages complémentaires :

- des stores occultant la lumière, intégrés aux faux plafonds et descendant verticalement à

l'aplomb des pupitres, afin de protéger contre un éblouissement direct du soleil, et qui peuvent par conséquent n'être disposés que sur les faces directement exposées,

- des films spécifiques de protection solaire, généralement de teinte bleutée, disposés sur toutes les faces, coulissant le long des vitrages, qui atténuent la lumière sans l'occulter, de manière à offrir, même par très forte luminosité, de bonnes conditions d'observation.

Contrairement aux stores, les films de protection solaire protègent moins, mais permettent la visibilité. Leur protection de l'œil est comparable à celle apportée par des lunettes de soleil, mais contrairement à celles-ci, le film permet de concilier, sans problème d'adaptation de l'œil, l'observation extérieure et celle des pupitres de travail des contrôleurs.

Ces films colorés de protection ne sont déployés qu'en cas de forte intensité solaire. Or les valeurs de transmission lumineuse et solaire obtenue en conjonction avec le vitrage teinté sont alors très faibles (< à 5 %).

Il en résulte un accroissement de l'absorption, qui peut conduire à une importante augmentation des risques de casse thermique et

Les protections solaires utilisées sont de 2 types :
- stores occultant la lumière
- films colorés transparents atténuant les trop fortes luminosités.
Il s'agit de 2 types de protections tout à fait différentes, qui peuvent être utilisées de manière complémentaire.

de températures des produits verriers, qui ne doit pas dépasser 60 °C pour les vitrages feuilletés.

D'où la nécessité de garder un minimum d'espacement (> 5 mm) entre le film et le vitrage.

Ces produits ont l'inconvénient d'être relativement fragiles. Leur entretien est donc délicat et nécessite un certain nombre de précautions.

L'anisotropie (« fleurs de trempe »)

Les exigences d'ordre mécanique et thermique conduisent souvent à la nécessité de tremper les vitrages.

Il existe deux procédés de trempe : l'un dit chimique, qui n'est pas applicable pour des dimensions supérieures à 3 m et ne peut donc, sauf exception, être utilisé dans le cas des vigies, pour lesquelles on utilise le mode de trempage thermique.

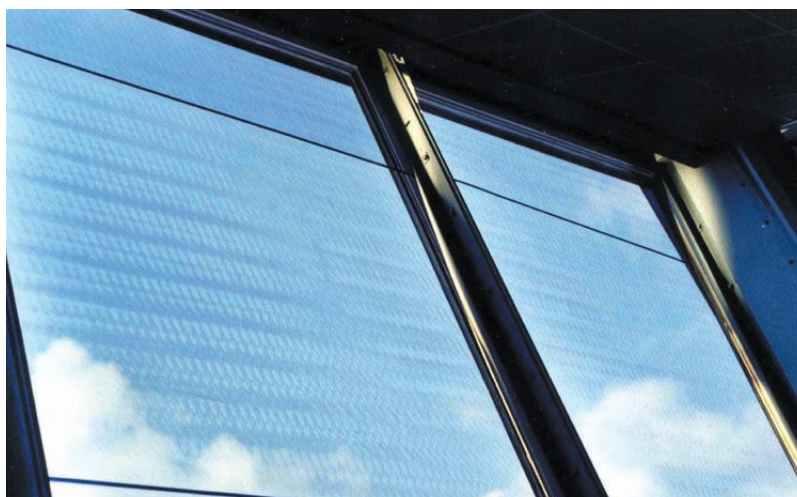
La trempe thermique consiste à chauffer le vitrage jusqu'à une température d'environ 600 °C, puis à le refroidir brutalement par jets d'air. Il résulte de l'important différentiel thermique ainsi obtenu entre la surface et le volume intérieur des différences de tensions qui, par un phénomène de précontrainte, donnent au vitrage des qualités de résistance mécanique et thermique.

Dans la pratique, le soufflage par jets d'air ne peut être réparti de façon parfaitement uniforme. Les hétérogénéités de surface ainsi induites affectent les propriétés de réflexion et se traduisent, sous éclairage naturel, par des phénomènes d'interférence appelés « fleurs de trempe ».

Ce phénomène est donc absolument inévitable dès qu'un vitrage a subi un trempage thermique, mais il importe de souligner que, dans la très grande majorité des cas, il est très faiblement perceptible. C'est pourquoi ces « fleurs de trempe » avaient été pratiquement ignorées dans le cas des vigies jusqu'à une époque récente. Elles ne sont généralement pas gênantes, si ce n'est sous un angle de vision « rasant ».



9 Des protections solaires complémentaires sont souvent nécessaires. Elles sont de deux types : stores, ou films colorés transparents - FORT-DE-FRANCE-LE LAMENTIN (MARTINIQUE)



10 Un exemple de « fleurs de trempage » inhomogénéité de surface consécutive ou trempage thermique, d'une ampleur inhabituelle, pouvant constituer une gêne visuelle

Exceptionnellement, si les « fleurs de trempage » présentent une amplitude inhabituelle, elles peuvent se révéler préjudiciables pour l'exercice du contrôle aérien, surtout lorsqu'elles sont accentuées par la superposition d'un film de protection solaire.

C'est pourquoi il est recommandé d'intégrer de nouvelles clauses dans les cahiers des charges concernant leurs vitrages, précisant que ceux-ci pourraient être refusés si leur transparence se révélait insuffisante. En effet il est prudent de faire une vérification visuelle *in situ*, dans des conditions représentatives, en superposant au vitrage, un échantillon du film de protection solaire qui sera mis en œuvre (généralement plusieurs mois après la réception de la partie bâtiment).

Il faut à nouveau souligner que ce genre de problème est exceptionnel (il n'est apparu gênant qu'en une seule occasion, sur des dizaines de vigies ainsi équipées). Comme il a pu être constaté lors de dernières réalisations, grâce à des clauses préventives des cahiers des charges, une sensibilisation en amont des fabricants, qui prennent ainsi un soin tout particulier lors de la phase de trempage thermique, conduit à des vitrages d'une grande qualité de transparence, sans pour autant induire de surcoûts prohibitifs.

Les « fleurs de trempes » sont de légères inhomogénéités de surface induites par le procédé de trempage thermique. Celles-ci ne sont généralement pas gênantes pour la vision des contrôleurs. Néanmoins, il faut veiller à éviter qu'elles présentent une ampleur inhabituelle.



Les préconisations actuelles et les évolutions envisageables

Les préconisations et recommandations actuelles

Les préconisations actuelles :

Le type de vitrage préconisé par le STAC au cours des dernières années pour les vigies d'aéroport est de type trempé et/ou feuilleté, de couleur verte, teinté dans la masse, et répondant aux coefficients caractéristiques précités (chapitre 2 les valeurs des coefficients caractéristiques). Ce vitrage sera incliné entre 18 et 20°, ce qui a des conséquences sur le calcul de ses épaisseurs. Par ailleurs, le double vitrage a été fortement déconseillé, à la suite des déconvenues rencontrées dans le passé.

Ces préconisations ont résulté bien sûr des exigences spécifiques pour ce genre de vitrages, mais aussi de l'expérience accumulée vis-à-vis des différentes techniques envisageables pour répondre à ces spécificités, des différents problèmes rencontrés in situ, et d'un certain recul dans le temps.

De nombreuses vigies équipées par des vitrages répondant à ces préconisations, donnent satisfaction dans leur très grande majorité.

Les exigences et indications des programmes de tour de contrôle en matière de vitrage :

Par ailleurs les programmes des tours de contrôle doivent exiger des architectes, une épure de visibilité, (faisant en particulier

Le type de vitrage le plus souvent préconisé pour les vigies d'aéroports est trempé, généralement feuilleté, et teinté dans la masse (de couleur verte de préférence)

Les différentes performances recherchées conduisent le plus souvent à retenir un vitrage trempé. Compte tenu des dimensions, le procédé de type chimique (limité à 3 m) n'est pas envisageable. Le trempage étant nécessairement thermique, il conviendra d'être vigilant par rapport aux éventuels problèmes de « fleurs de trempes ».

Les vitrages non trempés peuvent être utilisés, mais uniquement en solutions feuilletées ou « multi-feuilletées », et à condition de s'être assuré au préalable de l'absence de risque de casse thermique

apparaître les masques des poteaux de la vigie) prévue au projet afin de vérifier qu'ils ne sont pas rédhibitoires (cf. fascicule 2 : localisation et hauteur), ce qui entraîne des conséquences sur les dimensions et le positionnement de ces vitrages.

Il a été constaté que ces aspects peuvent ne pas être toujours suffisamment anticipés par un architecte à l'occasion d'une esquisse, ce qui peut le conduire à sous estimer l'importance (très inhabituelle par rapport aux bâtiments plus « classiques ») du lot vitrages. Il est donc particulièrement important de souligner et d'attirer l'attention dans un programme sur l'ensemble de ces problèmes, et en particulier d'anticiper les conséquences importantes, notamment financières, des dimensions tout à fait en dehors des standards usuels du bâtiment.

Le trempage (ou non) du vitrage :

Les performances mécaniques et thermiques recherchées ont conduit généralement, comme il a été exposé ci dessus, à choisir des vitrages trempés.

Une solution couramment employée consiste à associer, au sein d'un vitrage feuilleté, une face de verre trempée (à l'extérieur), collée à une face seulement « durcie » (semi-trempée) à l'intérieur.

Il peut même être parfois possible de n'utiliser que des vitrages « durcis » (ou semi-trempés), voire même recuits, en solutions feuilletées, à condition d'avoir vérifié au préalable par le calcul qu'il n'y avait aucun risque de fissuration thermique. Ce genre de problème, rencontré dans le passé, avait conduit à préconiser le trempé, afin de conserver des marges de sécurité suffisantes. De nouveaux logiciels de modélisation des phénomènes d'origine thermique, apparus ces dernières années, permettent de réduire les marges d'incertitudes grâce à des calculs plus précis. Les solutions feuilletées, voire « multi-feuilletées », peuvent éviter le trempage et ses contraintes (dimensions, « fleurs de trempage »,...), mais doivent être utilisées avec la plus grande prudence.

Le problème des « fleurs de trempe » :

Le seul problème rencontré du fait du trempage (selon le mode thermique) des vitrages est celui, exposé ci-dessus, des « fleurs de trempe ».

Mais, ce type de gêne est absolument exceptionnel, et les précautions prises dans la rédaction des cahiers des charges vis-à-vis de cette éventualité, ainsi que la vérification de cet aspect avant réception, devraient conduire les fabricants à être particulièrement précautionneux en matière de transparence, (cf.-paragraphe ci-dessus).

La question du double vitrage :

Le double vitrage, qui avait été utilisé dans le passé, a été fortement déconseillé en France au cours des dernières années.

Il avait été en effet constaté en plusieurs occasions des problèmes d'opacification progressive des doubles-vitrages au bout de quelques années, du fait de la perte d'étanchéité de la barrière de scellement, ce qui conduit à des pénétrations d'impuretés et d'humidité dans les interstices.

Par ailleurs, des phénomènes de reflets ou de dédoublement d'images ont été parfois signalés, mais cette gêne est néanmoins à relativiser. Aujourd'hui cette « gêne » peut être au besoin limitée par la mise en œuvre de couches antireflet.

Le double vitrage, du fait des progrès considérables réalisés en matière d'étanchéité, pourrait à nouveau se révéler intéressant dans certains cas, notamment des points de vue acoustique et thermique.

Les évolutions envisageables

Une récente étude a été menée par le STAC avec le centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) pour vérifier si les préconisations diffusées ces dernières années étaient à actualiser, compte tenu des progrès techniques intervenus en la matière des vitrages, et des éventuelles évolutions envisageables qui pourraient découler de ces progrès.

Les doubles vitrages (long-temps « pros-crits » dans les vigies), présentent dorénavant une étanchéité qui permet de réenvisager leur emploi dans certaines conditions environnementales particulières.

Les évolutions techniques offrent une gamme de produits qui élargit « l'éventail » des solutions.

Cette étude a, pour l'essentiel, confirmé le bien fondé de la plupart de ces préconisations, qui restent donc encore valables, et devraient continuer à servir de référence de base pour les nouvelles réalisations de vigie de tours de contrôle.

Par ailleurs cette étude a permis également d'envisager, et de tester sur des échantillons, les innovations qui pourraient être apportées. Les produits innovants qui pourraient le mieux correspondre aux besoins des vigies sont les couches dites à « haute performance ».

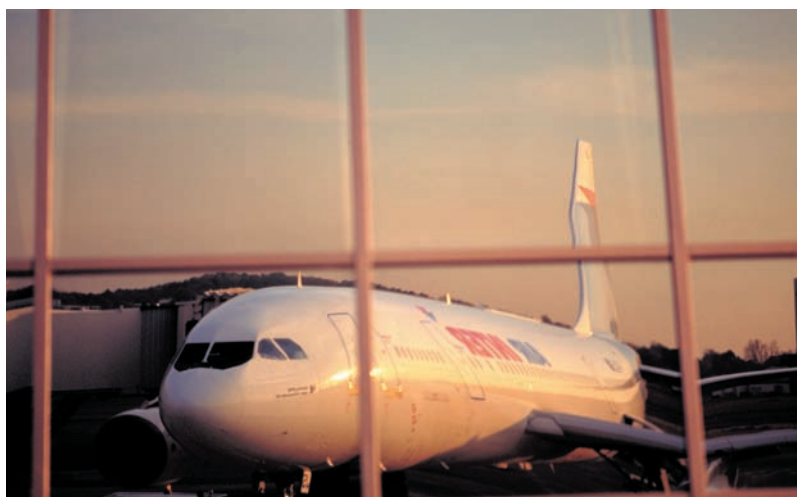
Il a ainsi été étudié la possibilité d'utiliser les procédés suivants :

- couches anti-reflets,
- couches basse émissivité, pour l'aspect thermique,
- verre au revêtement autonettoyant,
- mise en œuvre de PVB (Poly Vinyle Butyral), ou autre produit similaire, présentant des propriétés d'isolation acoustique.

Comme il a été signalé ci-dessus, les progrès en matière de double-vitrages peuvent permettre de réenvisager à nouveau leur usage, ce qui permettrait également la combinaison de plusieurs couches des produits innovants précités.

En ce qui concerne les différents types de produits « hautes performances », et leur éventuel intérêt pour les vigies d'aéroport, les conclusions de l'étude précitée sont les suivantes :

- les couches dites « auto-nettoyantes » ne peuvent présenter une certaine efficacité qu'avec un minimum d'écoulement naturel d'eau de pluie. Elles ne sont donc pas indiquées pour les vitrages des vigies, inclinés vers l'extérieur,
- les couches dites « anti-reflets », en fait, ne les suppriment pas totalement, mais les atténuent de façon significative,
- la substitution dans un vitrage feuilleté d'un film PVB « classique », par un PVB acoustique, permet d'atteindre des gains en affaiblissement acoustique R_w pouvant aller jusqu'à des ordres de grandeurs de 5 dB,
- la mise en œuvre de doubles vitrages per-



11 Le choix des vitrages de vigie peut désormais s'opérer dans un « éventail » de solutions variées, intégrant les procédés innovants

met également d'importants gains en isolation acoustique. À titre d'exemple, le fait de rajouter à un vitrage feuilleté « classique » disposé en face extérieure (épaisseurs de 8 et 6 mm) le fait de rajouter un vitrage de 6 mm, séparé par une lame d'air intermédiaire de 12 mm, conduit à passer d'un affaiblissement de 40 dB à une isolation de 43 dB (cf. tableau ci-après) ; or une augmentation de 3 dB revient à diviser par deux l'effet du bruit,

- du point de vue thermique, ainsi qu'on le voit sur le tableau ci-après, le fait de doubler une lame de verre, séparée par une couche d'air de 12 mm, conduit à diviser par deux la déperdition thermique, - enfin, ce facteur de déperdition thermique peut être porté à cinq si l'on ajoute, à l'intérieur de ce double-vitrage, une couche basse émissivité, et l'on remplace l'air par un gaz rare de type argon ou krypton.

Type de vitrage	Éléments favorables	Éléments défavorables
Verre feuilleté simple trempé Verre feuilleté multiple trempé	Coûts	Acoustique (sauf pour les PVB acoustiques) Thermique Inhomogénéité Maintenance et entretien
Verres à couches (anti-reflets ou basse émissivité)	Sélectivité (thermique ou lumineuse)	Maintenance Protection de la couche
Double-vitrage	Nombre de possibilités Gain acoustique Gain thermique	Coûts Poids Réflexion interne sans traitement ?
Verre autonettoyant	Diminution de la maintenance	Surcoût/verre classique Non efficace sur un vitrage incliné vers l'extérieur (sous écoulement d'eau)
Double-vitrage + couches : -auto-nettoyante basse émissivité	Voir ci-dessus	Surcoût/Verre classique

TABLEAU COMPARATIF

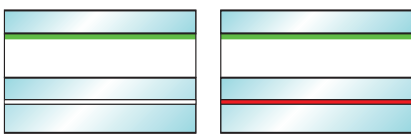
Type de vitrage												
												
Composition	Verre 4 mm	Double vitrage Verre 4 mm Air 12 mm Verre 4 mm	Double vitrage Verre 4 mm Air 12 mm basse émissivité Verre 4 mm	Verre 15 mm	Feuilleté Verre 8 mm PVB standard Verre 6 mm	Feuilleté Verre 8 mm PVB acoustique Verre 6 mm	Feuilleté Verre 6 mm PVB acoustique Verre 6 mm PVB acoustique Verre 15 mm PVB acoustique Verre 6 mm	Feuilleté Verre 6 mm PVB acoustique Verre 6 mm PVB acoustique Verre 15 mm PVB acoustique Verre 6 mm	Double vitrage Feuilleté Verre 8 mm PVB acoustique Verre 6 mm Air 12 mm Verre 6 mm	Double vitrage Feuilleté Verre 8 mm PVB acoustique Verre 6 mm Air 12 mm Verre 6 mm	Double vitrage Feuilleté Verre 8 mm PVB acoustique Verre 6 mm Air 12 mm Verre 6 mm basse émissivité Verre 6 mm	Double vitrage Feuilleté Verre 8 mm PVB acoustique Verre 6 mm Air 12 mm Verre 6 mm basse émissivité Verre 6 mm
Coefficient de transfert Thermique U (W/m²K)	5,8	2,9	1,1 - 1,7	5,5	5,4	5,4	5,3	5,3	5,3	2,8	2,8	1,1 - 1,7
Isolation Acoustique dB(A)	30	30	30	33	35	40	42	48	41	43	41 / 43 (Rq jusqu'à 46 dB(A) avec des épaisseurs plus importantes)	

Tableau C2 : résumé des caractéristiques thermiques et acoustiques suivant la composition du vitrage.
(Low ε) : représente une couche basse émissivité (0,04 <ε< 0,08) de couleur verte dans le tableau.
Les traits rouges représentent le PVB acoustique des vitrages feuilletés.



Conclusion

Les exigences spécifiques présentées en introduction conduisent à retenir, pour les vitrages de vigie d'aéroports, un ensemble de caractéristiques qui vient d'être présenté au chapitre précédent.

Avant de choisir plus précisément un type précis de vitrage, il convient au préalable d'examiner plus en détail l'ensemble des exigences du site considéré, avant d'en déduire les caractéristiques recherchées.

Ainsi, selon les aéroports, l'importance et la nature de leur trafic, et la position de la tour de contrôle, les exigences acoustiques pourront être très différentes. Elles n'auront pas non plus la même valeur prioritaire s'il s'agit de simple problème de « confort » ou d'un véritable enjeu de sécurité (par exemple en cas de nécessité de réagir immédiatement à un éventuel message oral du pilote d'un avion au décollage).

Par ailleurs, le contexte climatique peut conduire à investir dans une meilleure isolation thermique au niveau de la paroi vitrée, engendrant sur le long terme des économies en matière de climatisation.

Il existe désormais un « éventail » de solutions plus large que dans le passé, entre lesquelles il est possible de faire des choix mul-

Le choix du type de vitrage à retenir pour une vigie aéroportuaire résulte d'une approche multicritères.

ticritères, adaptés selon chaque cas de figure en fonction de la hiérarchie des objectifs poursuivis.

Dans le cas d'un simple remplacement de vitrages, en conservant les châssis existants, le choix sera généralement très limité (trempé, éventuellement feuilleté) du fait des limitations d'épaisseurs induites par l'existant.

Dans le cas d'un nouveau projet, les préconisations usuelles (vitrage trempé et/ou feuilleté, répondant aux coefficients caractéristiques requis, de couleur verte) devraient rester suffisantes dans la majorité des cas. Toutefois, si les exigences acoustiques et thermiques le justifient, et si les contraintes économiques le permettent, il peut être envisagé de mettre en œuvre l'une des solutions innovantes présentées plus haut. Une étude comparative globale devra néanmoins être faite pour vérifier sa pertinence.

Dans tous les cas de figure, il faut exiger avant tout choix des produits verriers, un calcul de résistance mécanique, ainsi que conditions thermiques (avec et sans protections solaires) sur l'ensemble des faces afin de vérifier qu'il respecte les normes et les recommandations.



Annexe 1 : glossaire

Glossaire

Les produits de base

Le verre flotté (float glass)

Le verre flotté est un verre plan, recuit, transparent, clair ou coloré, dont les deux faces sont planes et parallèles. C'est le produit de base le plus couramment utilisé et le seul adapté à la fabrication des vitrages de vigie.

Les produits transformés

Le verre trempé thermiquement

Le verre trempé thermiquement (appelé ainsi par opposition au verre recuit) est un verre ayant subi un traitement thermique visant à augmenter sa résistance et à modifier sa fragmentation. Le verre est d'abord chauffé jusqu'à environ 600-650 °C avant de subir un refroidissement brutal par jets d'air. De la sorte, la partie extérieure de la feuille de verre refroidit avant la partie intérieure, ce qui induit des contraintes permanentes dans le verre. La zone centrale est mise en traction, alors que les parties proches des faces de la feuille de verre sont soumises à des contraintes de compression. De ce fait, lorsque la feuille de verre est fléchie, les contraintes de compression superficielles doivent être compensées avant que ne puissent apparaître en surface des tensions de traction susceptibles d'entraîner la rupture du verre. Ce type de verre possède dès lors une résistance aux sollicitations mécaniques et thermiques cinq fois supérieure à celle du verre recuit.

On distingue deux types de trempes thermiques :

- la trempes verticale : le verre est suspendu à des pinces pendant l'opération de trempes, ce procédé est pratiquement abandonné de nos jours.
- la trempes horizontale : le verre repose sur des rouleaux horizontaux pendant l'opération de trempes.

Les verres trempés thermiquement présentent des caractéristiques fondamentalement différentes de celles de produits de base dont ils sont issus :

- ils ne peuvent plus être coupés, sciés, percés ou façonnés après l'opération de trempes, car celle-ci introduit des contraintes importantes dans le verre,
- ils ont une résistance mécanique et une résistance aux chocs nettement plus élevés,
- ils se caractérisent par une résistance aux chocs thermiques plus élevée : ils peuvent résister à un différentiel de température de l'ordre de 200 °C, alors que pour le verre recuit, la rupture peut se produire à partir de différentiel de l'ordre de 30°C.

Cette dernière valeur est cependant fort variable et dépend entre autres de la qualité du façonnage du bord de verre.

- En cas de bris, ils se fragmentent en morceaux non coupants et plus petits que le verre recuit, ce qui limite les risques de coupure. De ce fait, le verre trempé est considéré comme un verre de sécurité pour certaines applications.
- Les procédés de trempes thermique font que le verre trempé n'est pas aussi plan que le verre recuit. De plus, pour un verre trempé verticalement, les pinces provoquent des déformations appelées « points de trempes ».
- La compression induite à la surface du verre trempé le rend anisotrope. Sous éclairage naturel, les propriétés de réflexion varient de point en point et l'aspect superficiel de la feuille de verre peut présenter des desseins diversement colorés dus à des phénomènes d'interférences appelés fleurs de trempes.

Le verre durci Il s'agit d'un verre qui a subi un traitement thermique semblable à la trempe thermique mais pour lequel le niveau de contraintes obtenu est inférieur à celui du verre trempé, car le refroidissement a été réalisé de manière plus lente. Les verres durcis présentent des caractéristiques fondamentalement différentes de celles des produits de base dont ils sont issus :

- ils ne peuvent plus être coupés, sciés, percés ou façonnés après l'opération de durcissement ; les découpes ou les trous éventuels doivent être dès lors réalisés avant durcissement,
- leur résistance aux chocs thermiques est plus élevée que celle du verre recuit : ils peuvent résister à un différentiel de température de l'ordre de 100 °C, alors que, pour le verre recuit, la rupture peut se produire à partir de différentiel de l'ordre de 30°C. Cette valeur est cependant fort variable et dépend entre autres de la qualité du façonnage du bord de terre.
- en cas de bris, les morceaux (comparables à ceux du verre recuit) peuvent provoquer des blessures. Les verres recuits ne sont dès lors jamais considérés comme des verres de sécurité. Le schéma de casse des verres durcis est facilement reconnaissable à sa forme en étoile.
- ils peuvent présenter le même phénomène d'hétérogénéité de surface que le verre trempé thermiquement.

Le verre trempé chimiquement Le but est le même que pour le verre thermiquement, mais la trempe s'obtient par un procédé chimique. La méthode consiste à immerger le verre dans un bain de sels fondus placés à une température d'environ 400 °C. Il y a alors échange chimique entre les ions K⁺ du bain de sels fondus KNO₃ et les ions Na⁺ présents dans le verre. Les ions K⁺ (de taille 2.66 Å) prennent la place des ions Na⁺ (de taille 1.96 Å). Les ions K⁺ étant de taille supérieure, ils induisent une compression à la surface du verre, ce qui le rend plus résistant. La durée d'immersion détermine le niveau de contraintes obtenu. La répartition des contraintes n'a pas la même allure que dans le cas du verre trempé thermiquement.

Le verre feuilleté Le verre feuilleté est un ensemble constitué d'au moins deux feuilles de verre assemblé sur toute leur surface par un intercalaire. L'intercalaire peut être un ou plusieurs films en matière synthétique, ou une résine. Il a pour but de coller les feuilles de verre tout en conférant des performances supplémentaires au produit fini. Ces performances peuvent être la limitation du risque de blessure en cas de bris, la protection contre l'effraction, la protection contre l'incendie, l'isolation acoustique, la décoration...

La méthode de fabrication du verre feuilleté est fonction de l'intercalaire. Dans le cas des films synthétiques, il s'agit d'un procédé de laminage. Le ou les films de PVB (poly-vinyl de butyral) sont placés entre les feuilles de verre, les bulles d'air éventuelles sont éliminées par calandrage et l'adhésion est obtenue en soumettant l'ensemble à pression et température élevées dans un autoclave. En présence de résines, il s'agit d'un procédé de coulage qui consiste à placer un espaceur sur le pourtour des verres, puis à faire pénétrer la résine liquide entre les verres. Le durcissement est obtenu par une réaction de polymérisation sous des lampes UV.

Les verres à couches Un verre à couche est obtenu par dépôt d'une ou plusieurs couches de matières inorganiques, le plus souvent sur une seule face du verre, afin de modifier les propriétés physiques (facteur solaire, coefficient de transmission thermique, cou-

leur) et/ou optiques (transmission et réflexion).

Les verres à couches peuvent être classés selon trois critères :

- le mode de fabrication de la couche (pyrolitique, sous vide ou trempé),
- l'emplacement de la couche sur le vitrage lors de la mise en œuvre,
- l'application réservée au vitrage.

Les verres à couches peuvent, pour la plupart, être trempés, durcis, feuilletés ou bombés. Il existe trois modes de fabrication des verres à couches :

- les dépôts pyrolitiques : il s'agit de couches d'oxydes ou de mélange d'oxydes. Ces dépôts sont réalisés en continu à haute température (500 à 700 °C) pendant la fabrication du verre à la sortie du bain de métal en fusion. Ces couches se caractérisent par une bonne durabilité et sont appelées des couches dures.
- les dépôts sous vide : ces couches peuvent être soit des oxydes, soit des métaux. Les dépôts sont réalisés à température ambiante, en dehors des lignes de fabrication du verre, à l'aide d'un magnétron. Il s'agit d'une enceinte fermée hermétiquement contenant un gaz neutre dans laquelle une différence de potentielle est créée entre deux électrodes. L'opération se déroulant à faible pression, ces conditions permettent l'émission par une cathode d'ions métalliques, dont certains vont se déposer sur la face du verre. La ligne de fabrication possède plusieurs chambres successives permettant de réaliser des dépôts multicouches (par exemple : couche d'adhérence au verre, couche donnant les propriétés recherchées au verre, puis couche de protection contre les actions mécaniques et chimiques). La résistance de ces couches est fonction de la composition chimique. À l'origine, ces couches étaient très fragiles et devaient être placées à l'intérieur d'un double vitrage pour éviter toute détérioration. Actuellement, leur résistance a augmenté, mais elle est toujours inférieure à celles des couches pyrolitiques et leur utilisation en simple vitrage n'est pas toujours possible.
- les dépôts au trempé : ce procédé assez rare (couche anti-reflet), consiste à plonger le verre dans une solution saline afin de réaliser un dépôt sur les deux faces et ce, contrairement aux deux types de traitement précédent.

Le double vitrage

Il s'agit d'un ensemble de deux feuilles de verre assemblées et scellées en usine, séparées par un espace hermétique clos renfermant de l'air ou un gaz déshydraté. Le but premier de cet assemblage est de bénéficier du pouvoir isolant apporté par la lame de gaz et de la sorte de faire baisser le coefficient de déperdition thermique U. Le pouvoir isolant peut encore être augmenté de différentes manières (couche basse émissivité,...).

Les faces d'un double vitrage sont conventionnellement numérotées en position 1 à 4 de l'ambiance extérieur vers l'intérieur.

Le double vitrage se compose des éléments suivants :

- deux feuilles de verre
- un espaceur servant à fixer la largeur de l'espace entre les feuilles de verre
- deux barrières d'étanchéité qui limitent au maximum les infiltrations d'eau et d'humidité dans le volume scellé. La première est en polyisobuthylène et la seconde est le plus souvent formée de polyuréthane, de silicone ou de polysulfure
- un dessiccant introduit dans l'espaceur est destiné à assécher le gaz emprisonné à la fermeture du vitrage et à absorber la vapeur d'eau qui pénétrerait éventuellement par diffusion à travers le scellement périphérique.

Le bon fonctionnement du dessiccateur et des barrières d'étanchéité conditionne la durée de vie du double vitrage. Si le dessiccateur perd de son efficacité ou si le scellement n'est plus hermétique, de la condensation peut se former à l'intérieur du vitrage, ce qui implique le remplacement du vitrage.

Un double vitrage est susceptible de subir des déformations. En effet le jour de sa fabrication, la lame de gaz est enfermée à une température et une pression barométrique donnée. Or, la pression et la température changent ultérieurement et engendrent un cintrage léger des vitrages qui peut entraîner des phénomènes optiques qui sont naturels et ne peuvent être évités.

L'isolation thermique peut être combinée à une isolation acoustique, à une protection solaire ainsi qu'à des fonctions de sécurité et de protection contre l'effraction.

L'autre technique est le dépôt d'une couche de type basse émissivité sur la surface du verre. Cette couche est connectée à une alimentation électrique qui par effet joule chauffe le verre (vitrage chauffant).

Dans les deux cas, la puissance électrique peut-être modulée en fonction de la fonction principale du vitrage : confort ou chauffage. Dans le cas de la recherche de confort, la puissance électrique est de 50 à 100 W/m² pour une température de surface du verre de l'ordre de 20 à 40 °C, la puissance électrique sera de 100 à 300 W/m².

Les verres feuilletés ou à couches utilisées pour un vitrage chauffant sont des verres trempés.

Vitrage faible réflexion ou anti-reflet

Les vitrages antireflet améliorent le confort visuel grâce à la diminution de la réflexion lumineuse par un facteur 10 : de 8 % pour un simple vitrage à moins de 1 %. Cette faible réflexion lumineuse permet d'une part de voir très nettement les objets ou paysages placés de l'autre côté du vitrage sans être gêné par les réflexions parasites de la lumière ou de l'environnement, et d'autre part d'apprécier de manière optimale le rendu et le contraste des couleurs. Les couches anti-reflet sont des couches d'oxydes métalliques qui peuvent être déposés par plusieurs méthodes : pulvérisation, évaporation sous vide, ou immersion. Les verres traités par immersion pour l'architecture ont une couleur résiduelle verte. Cette réflexion résiduelle verte a l'avantage d'apporter une certaine neutralité en transmission et d'occasionner une dépendance relativement faible de l'effet anti-reflet à l'angle de vision. D'autre part, ce procédé d'immersion permet un nettoyage aisé.



Annexe 2

Choix de la teinte des vitrages

Actuellement, le STAC préconise un verre teinté dans la masse de couleur verte de préférence par rapport au gris et au bronze. D'un point de vue physique, un verre de teinte neutre (gris, bronze) a une réponse spectrale relativement plate (dans la partie visible du spectre) donc peu d'influence sur le coefficient Ra (Rendu des couleurs). Ce coefficient est établi à partir d'une moyenne sur 8 couleurs de référence. Plus la valeur de ce coefficient est proche de 1, plus la déformation des couleurs à travers le vitrage est faible. Dans le cas de verre teinté (bronze, vert, bleu,...) la réponse spectrale dans la partie visible présente des pics plus ou moins prononcés suivant la nature et l'intensité de la coloration (figure A1). Cette coloration influe très fortement sur la valeur du coefficient Ra (tableau A1).

Comme l'indique le tableau A1, le coefficient de rendu des couleurs pour la teinte bleu est bien inférieure à la valeur minimale de 90 %, préconisation actuelle du STBA. La teinte bronze qui a une réponse spectrale relativement tourmentée donne globalement la valeur la plus importante.

Pour effectuer le choix définitif de la teinte du verre, il faut tenir compte de la réponse de l'œil.

Figure A1 :
Réponse spectrale en fonction de la coloration du verre

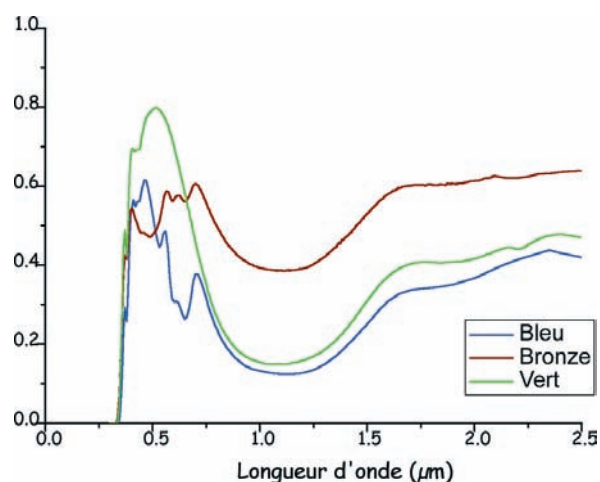


Tableau A1 : Coefficient Ra (Rendu des couleurs) en fonction de la couleur du verre

Couleur	Bleu	Bronze	Vert
Ra	74	94	90

La rétine de l'œil contient deux types de cellules sensibles : les cônes et les bâtonnets.

Les bâtonnets sont responsables de la vision nocturne (vision scotopique) et possèdent un maximum de sensibilité vers 510 nanomètres (nm). Leur sensibilité est liée à un colorant, la rhodopsine, qui blanchit à la lumière du jour, expliquant par là leur insensibilité dans la journée. Les bâtonnets ne fournissent qu'une réponse photométrique et ne permettent donc pas de déterminer les couleurs : la nuit, tous les chats sont gris.

Les cônes fournissent une réponse photométrique et chromatique, grâce à des pigments dont les maximums d'absorption se situent dans le bleu, le vert ou le rouge. C'est là, la base de la vision des couleurs et son aspect trichromatique.

L'œil ne présente pas la même sensibilité dans toutes les longueurs d'onde. Une étude statistique réalisée par la CIE (Commission internationale de l'éclairage) [3] a permis de déterminer la sensibilité spectrale moyenne de l'œil humain. La courbe obtenue, appelée courbe de visibilité (Figure A3), est intégrée dans certains appareils de mesure, afin qu'ils analysent les couleurs de la même manière que celle perçue par l'homme.

On remarque, d'après cette courbe, qu'une source de lumière située vers 660 nm doit être environ 10 fois plus lumineuse qu'une source de 560 nm pour être perçue avec la même intensité. Cette valeur n'est bien sûr qu'une moyenne, chaque individu possédant sa propre sensibilité chromatique.

Au regard de la figure A2, la courbe de sensibilité spectrale de l'œil humain a une réponse Gaussienne centrée sur la longueur d'onde de 550 nanomètres qui correspond à la couleur verte.

Figure A2 :
Sensibilité de
l'œil humain [2]

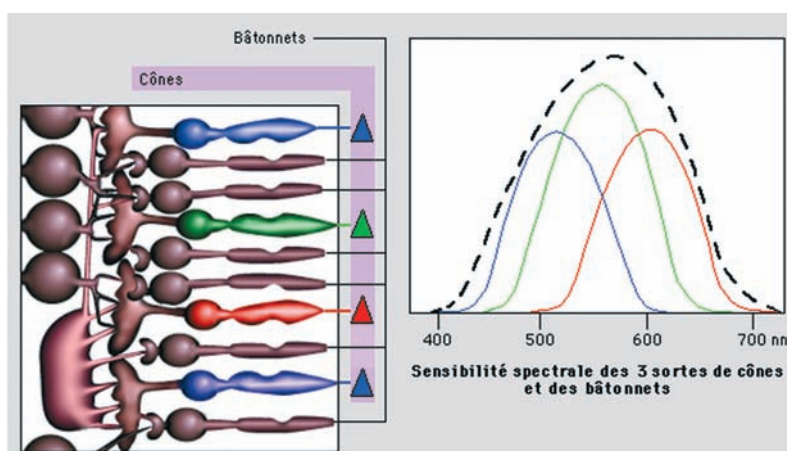
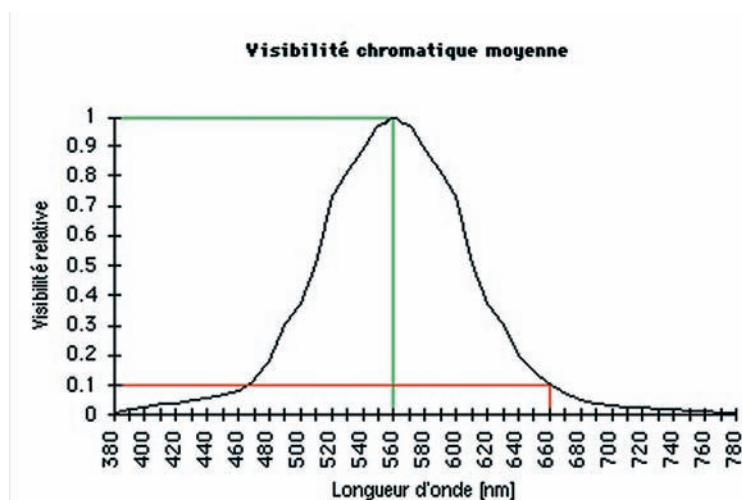


Figure A3 :
Visibilité chro-
matique de
l'œil [2]



Document réalisé par le service technique de l'aviation civile

Rédaction : département Bâtiments

Conception : département SINA, groupe Documentation et diffusion des connaissances

Impression : atelier de reprographie

Janvier 2007



direction générale
de l'Aviation civile

**service technique
de l'Aviation civile**

31, avenue du Maréchal Leclerc
94381 Bonneuil-sur-Marne cedex
téléphone : 01 49 56 80 00
télécopie : 01 49 56 82 19
www.stac.aviation-civile.gouv.fr

ISBN 978-2-11-096936-1

