

CARACTERISATION DE L’AFFAIBLISSEMENT ELECROMAGNETIQUE DES VITRAGES

RAPPORT FINAL

N/Réf. DSC/ECE/2018-121

29/11/2019

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
1 - CONTEXTE	3
2 - ETUDE SUR LES PRODUITS ET TECHNOLOGIES DE VITRAGES EXISTANTS	4
2.1 - LES ACTEURS DU MARCHÉ	4
2.2 - GRANDEURS CARACTERISTIQUES DES VITRAGES.....	4
2.3 - LES DIFFERENTS TYPES DE VITRAGES.....	5
2.4 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU VITRAGE FAIBLE EMISSIVITE	6
2.4.1 - Couches dures, de type pyrolytiques (« hard coating ») – 1 ^{ère} génération	7
2.4.2 - Couches tendres (« sputtering magnetron ») – 2 ^{ème} génération	8
2.5 - L'ETAT DU PARC DE VITRAGES A COUCHES EN FRANCE	9
2.6 - CARACTERISTIQUES ELECTROMAGNETIQUES D'UN VITRAGE MULTICOUCHES.....	10
3 - SELECTION D'ECHANTILLONS	11
4 - MESURES DES PERTES EN TRANSMISSION.....	13
4.1 - PROCEDURE DE MESURES	13
4.2 - RESULTATS DE MESURE DE PERTES EN TRANSMISSION.....	15
4.2.1 - Mesures en incidence normale.....	15
4.2.2 - Influence de l'angle d'incidence	20
4.2.3 - Synthèse des résultats de la campagne de mesures	24
5 - CONCLUSION.....	26

1 - CONTEXTE

Compte tenu de l'évolution des réglementations thermiques et l'amélioration constante de l'isolation des bâtiments neufs et existants, le marché des vitrages a considérablement évolué ces dernières années, avec l'apparition et la généralisation progressive de vitrages peu émissifs ou à isolation thermique renforcée.

Ces produits sont des doubles ou triples vitrages comportant sur l'une ou plusieurs des faces internes un revêtement spécifique jouant le rôle de barrière thermique en réduisant de façon importante les pertes de chaleur. Ce revêtement est un dépôt métallique à base d'argent, de nickel ou de titane. Ces vitrages peuvent aussi être complétés par d'autres couches comme une couche de protection solaire qui consiste aussi en un dépôt métallique, basé sur différents alliages en fonction du niveau de protection attendu et du rendu visuel du vitrage (couleur, effet opacité, etc.).

Ces couches métallisées peuvent générer un affaiblissement important du vitrage vis-à-vis des ondes électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences et ainsi atténuer fortement la qualité de service des réseaux de téléphonie mobile en diminuant le niveau de champ à l'intérieur du bâtiment.

La présente étude consiste à analyser les produits et technologies de vitrages existants sur le marché de la construction, puis sélectionner un ensemble de produits représentatifs pour quantifier en laboratoire leur affaiblissement électromagnétique.

Vingt-cinq échantillons de vitrages ont été approvisionnés et leurs indices d'affaiblissements aux ondes électromagnétiques ont été évalués en laboratoire, par la mesure des pertes en transmission dans la bande de fréquences 700 MHz à 20 GHz.

2 - ETUDE SUR LES PRODUITS ET TECHNOLOGIES DE VITRAGES EXISTANTS

2.1 - Les acteurs du marché

Les acteurs, industriels ou artisans, sont nombreux depuis la fabrication d'un verre jusqu'à la pose dans un bâtiment neuf ou en rénovation d'une fenêtre dont ce verre constitue un des éléments du vitrage : les concepteurs gammistes pour la conception des menuiseries et profilés (PVC, aluminium, bois), les fabricants de verres, les transformateurs de verres, les fabricants de vitrages (superposition de plusieurs verres), les fabricants et assembleurs de fenêtres, les distributeurs, les poseurs, etc.

Le marché du verre englobe plusieurs types de verres, en fonction des applications et usages :

- verre plat (vitrages, miroirs) ; le verre plat est vendu en l'état ou travaillé par des spécialistes du façonnage et de la transformation : verre feuilleté (ajout de couches plastiques), trempé (verres renforcés par traitements chimiques ou thermiques) ou traité en surface (verres à couches anti-reflet, hydrophobe, isolation thermique, etc.)
- verre creux destiné à l'emballage,
- fibre de verre,
- verre cellulaire.

Le secteur du bâtiment, que ce soit dans le neuf ou en rénovation, dans le tertiaire et résidentiel, est le premier marché utilisateur de verres plats, devant le secteur des transports (automobile, ferroviaire). La fabrication du verre plat est réalisée dans de grandes unités industrielles, sur un outil spécifique, le float.

Nous nous intéressons dans cette étude aux verres plats à couches ; certaines couches pouvant être en partie métallisées. Les fabricants de verres à couches sont nombreux : AGC, Saint Gobain Glass (SGG), Pilkington, Guardian, Riou Flat Glass, Arino Duglass, Glaströsch, Siseecam Flat Glass, NSG Group, Mediterranean Float Glass, Scheuten Produits Verriers, Euroglas Polska, etc.

2.2 - Grandeurs caractéristiques des vitrages

Plusieurs grandeurs physiques caractérisent un vitrage, ou une fenêtre complète, par rapport aux apports thermiques et lumineux.

Le coefficient de transfert thermique d'une paroi

Le coefficient de transfert thermique d'une paroi est la quantité de chaleur traversant cette paroi en régime permanent, par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de températures, entre les ambiances situées de part et d'autre de la paroi. Il

s'exprime en $W/m^2/K$. Il traduit la capacité d'un vitrage à stopper les déperditions de chaleur. Le coefficient de transfert thermique est l'inverse de la résistance thermique totale de la paroi (R). Ce coefficient se décline en fonction des configurations : la valeur pour la fenêtre complète (U ou U_w), la valeur au centre du vitrage (U_c), la valeur pour le cadre de la fenêtre (U_f). Pour une fenêtre complète, le coefficient U vaut entre 1 et $10 W/m^2/K$. Plus sa valeur est faible et plus la façade sera isolée.

Le facteur solaire

Le facteur solaire (g) s'exprime en % et caractérise la quantité d'énergie solaire que laisse passer un vitrage par rapport à l'énergie solaire incidente. Il mesure donc la contribution d'un vitrage à l'échauffement de la pièce. Plus le facteur solaire est petit, plus les apports solaires sont faibles.

La transmission lumineuse

La transmission lumineuse (TL) s'exprime en % et caractérise la quantité de lumière transmise à travers un vitrage. Plus ce coefficient est élevé, meilleur est le passage de la lumière.

L'émissivité

L'émissivité traduit l'aptitude de la fenêtre et du vitrage à émettre des rayonnements énergétiques dans le domaine des très grandes longueurs d'onde (infrarouge). Plus la valeur d'émissivité est élevée, plus sa chaleur s'échappe par rayonnement, surtout la nuit et l'hiver. La valeur de l'émissivité est comprise entre 0 et 1 ; la valeur maximale correspondant au maximum théorique d'énergie radiante pour une température donnée.

2.3 - Les différents types de vitrages

Il existe sur le marché du bâtiment des vitrages simples (monolithiques ou feuilletés), des vitrages isolants (doubles, triples) ou des associations de vitrages, comme dans le cas de façades double-peau. Les composants verriers peuvent comporter une ou plusieurs couches supplémentaires spécifiques : couche de faible émissivité, de protection solaire (contrôle solaire), anti-reflet, autonettoyante, anti-condensation, etc.

Vitrages isolants

La composition d'un vitrage isolant se présente sous la forme suivante : épaisseur du 1^{er} verre (en mm), dimension de l'espace d'air ou de gaz (en mm), épaisseur du second verre (par exemple : 4-16-4, 6-16-4, etc.). S'il s'agit d'un triple vitrage, la composition comprend aussi la dimension du second espace d'air ou de gaz, et l'épaisseur du troisième verre (par exemple : 4-12-4-12-4).

Les propriétés d'isolation thermique des vitrages ont été considérablement améliorées par l'utilisation de doubles ou triples vitrages, par le remplacement de l'air par un gaz lourd

(généralement de l'argon, parfois du krypton) dans la lame isolante, et par l'utilisation de couches à faible émissivité de plus en plus performantes à l'intérieur de la lame d'air/de gaz. Tous les fabricants mettent désormais sur le marché des vitrages à couches d'émissivité très faible, jusqu'à des valeurs d'émissivité de l'ordre de 1%. L'empilement et les caractéristiques des couches et donc le spectre de transmission sont très variables d'un vitrage à l'autre.

La couche de verre à basse émissivité peut être aussi combinée avec une couche de contrôle solaire pour bénéficier, en même temps, des avantages dérivés de la rétention de chaleur dans le bâtiment (en hiver) et ceux d'une réflexion solaire renforcée (en été), en particulier dans des immeubles du tertiaire, pour par exemple réduire les besoins en climatisation.

Selon les produits et fabricants, le vitrage à faible émissivité peut se combiner avec d'autres fonctions : isolation acoustique, anti-condensation, anti-reflets, auto-nettoyage, sécurité anti-effraction ou anti-vandalisme, résistance aux rayures, etc.

Les vitrages feuilletés

Le verre feuilleté est un assemblage de feuilles de verre et d'intercalaires sous forme de résines ou de films plastiques : polybutyral de vinyle (PVB), éthylène vinyle acétate (EVA), résines ionomères, etc. Selon la nature des intercalaires, le verre feuilleté peut avoir différentes caractéristiques : isolant acoustique, résistance mécanique (effraction, sécurité), résistance au feu, rendu décoratif (film de couleur ou à motifs), etc.

La composition d'un vitrage feuilleté se présente sous la forme : épaisseur du 1^{er} verre (en mm), épaisseur du second verre et nombre de couches d'intercalaires polymères. Par exemple, un verre feuilleté 44.2 est composé de 2 couches de verres de 4 mm assemblées par deux couches d'intercalaires.

Le verre feuilleté peut être associé à d'autres verres, avec ou sans couches, dans des doubles ou triples vitrages.

Façades double peau

Une façade double peau est une façade simple doublée à l'extérieur du bâtiment par une façade en partie vitrée. Ce type de façade peut avoir plusieurs intérêts : régulation thermique, ventilation, protection mécanique, isolation phonique, conception architecturale, etc. Au niveau des ouvertures (fenêtres et parois vitrées), la façade double peau consiste donc en une superposition de vitrages, par exemple l'association d'un vitrage simple et d'un double vitrage.

2.4 - Principe de fonctionnement du vitrage faible émissivité

Le principe des vitrages faible émissivité est de laisser pénétrer les apports solaires (chaleur et lumière, longueurs d'onde courtes) dans un sens, tout en empêchant les rayonnements infrarouges de grande longueur d'onde (chaleur des objets et murs de la pièce) de passer dans l'autre sens.

Un vitrage standard a une émissivité de l'ordre de 0,85, ce qui signifie qu'il rayonne 85 % du maximum théorique d'énergie radiante à une température donnée. Un vitrage faible émissivité a une émissivité de l'ordre de 1% à 10%. Il ne va donc perdre par rayonnement que 1% à 10% de la chaleur qu'il reçoit. Ce principe permet de conserver la chaleur intérieure en hiver et d'empêcher la pénétration de la chaleur extérieure en été.

Ce principe de fonctionnement repose dans le cas d'un double vitrage sur l'insertion de couches d'oxyde métallique sur la surface intérieure de la vitre, côté intérieur. Dans le cas du triple vitrage, plusieurs couches d'oxyde métallique sont utilisées (en faces 2 et 5 généralement).

Il existe principalement deux familles de couches faible émissivité, en fonction de l'évolution du procédé de dépôt de la couche sur le verre.

La couche peut être déposée sur le float, lorsque le verre quitte le bain d'étain. La couche est dite dure (pyrolytique) et résiste aux agressions mécaniques. Ce type de verre bas émissif peut être coupé, trempé ou feuilleté, de la même façon qu'un verre ordinaire.

Les verres à couches faibles émissivité peuvent également être produits en déposant une couche argentée dans un four magnétron (couche dite tendre, par pulvérisation sous vide). Ce type de verre est utilisé en vitrage isolant, avec la couche en face intérieure ; celle-ci étant moins résistante qu'une couche dure. Ce verre peut-être également trempé ou feuilleté.

Type	Avantages	Inconvénients
Couche dure (pyrolytique) 1 ^{ère} génération	Apport de chaleur solaire Durée de vie	Perte par rayonnement infrarouge
Couche tendre (pulvérisation sous vide) 2 ^{ème} génération	Meilleure isolation thermique Meilleure transmission lumineuse	Durée de vie plus limitée

Table 2-1 : les deux types de technologies de couches faible émissivité

Ainsi les couches dites tendres (deuxième génération), par leur plus faible valeur d'émissivité, ont supplanté dans une grande mesure les couches dites dures développées initialement (première génération). Celles-ci existent cependant toujours, pour une utilisation en face extérieure notamment.

2.4.1 - Couches dures, de type pyrolytiques (« hard coating ») – 1^{ère} génération

Ce sont des couches à base d'oxyde métalliques. Elles sont déposées juste à la sortie du float, par une technique de pyrolyse. Le verre est trempé après le dépôt de la couche.

Les verres peu émissifs du type pyrolytiques provoquent quelques difficultés de trempe engendrées par la dissymétrie de rayonnement des deux faces du verre (une seule face étant recouverte d'une couche d'oxydes métalliques). Pour obtenir une trempe homogène (sans déformation), le volume doit être chauffé de manière symétrique et subir un refroidissement plus rapide qu'avec un verre ordinaire.

Les oxydes métalliques les plus utilisés sont oxyde d'indium dopé à l'étain (IN2O3 :SnO2 - ITO), l'oxyde d'étain dopé au fluor (SnO2 :F - TFO), l'oxyde de Zinc dopé au Gallium (ZnO :Ga - GZO). L'argent n'entre généralement pas dans la composition de la couche.

Les avantages de ce type de couches sont les stabilités chimique et mécanique et une faible absorption du rayonnement visible et proche infrarouge. L'épaisseur de cette couche est d'environ 0,1 μm . Les propriétés typiques sont un facteur de transmission lumineuse de l'ordre de 90%, un facteur solaire de l'ordre de 75% et une valeur d'émissivité de l'ordre de 0,2.

2.4.2 - Couches tendres (« sputtering magnetron ») – 2^{ème} génération

Ce sont des couches plus fragiles, déposées sous vide par procédé magnétron (pulvérisation sous vide ou évaporation thermique) et composées d'un empilement de couches métalliques entourées de couches diélectriques. Les couches extérieures sont généralement à base d'oxydes métalliques (TiO₂, ZnO, ZnS, SnO₂, Bi₂O₃, In₂O₃). Les couches métalliques sont souvent à base d'argent (Ag), du fait de sa faible absorption dans le domaine visible : une seule couche, couches double argent, couches triple argent, etc. L'Or (Au), le cuivre (Cu) ou l'aluminium (Al) peuvent aussi être utilisés, bien qu'ayant des propriétés optiques moins bonnes, avec une coloration plus élevée de la couche métallique.

La couche métallique a une épaisseur d'environ 9 à 15 nm, en fonction de la technique de dépôt utilisée.

Les couches les plus modernes, de 300 nm d'épaisseur environ, sont composées d'une dizaine voire plus de couches métalliques ou céramiques dont trois couches d'argent (couches « triple-argent »). Ces couches permettent de conserver une transmission lumineuse de 70% environ et améliore encore les performances thermiques par rapport aux couches « double-argent ».

Film D/Ag/D avec épaisseurs 40/20/40nm, adapté plus spécifiquement à du contrôle solaire : transmission lumineuse \approx 85%, facteur solaire \approx 50% et émissivité \approx 0,05

Film D/Ag/D avec épaisseurs 30/10/30nm, adapté plus spécifiquement à de l'isolation thermique : transmission lumineuse \approx 87%, facteur solaire \approx 72% et émissivité \approx 0,15
--

Film ZnS/Ag/ZnS avec une transmittance maximale autour des rayonnements dans le proche infrarouge (550 nm)
--

Films ZnS/Cu/Ag/ZnS ou ZnS/Al/Ag/ZnS avec une couche ultramince (<5 nm) de cuivre ou d'aluminium superposée à la couche d'argent, pour une émissivité faible et bonne stabilité thermique
Empilement de 5 couches de type ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS pour une émissivité très faible, inférieure à 0,02

Table 2-2 : exemple de technologies de couches tendres

Le marché du verre et des vitrages à couches étant un secteur très fortement concurrentiel, il n'a pas été possible d'avoir des données diffusables précises de la part des fabricants sur le nombre et la composition exacte des couches utilisées.

2.5 - L'état du parc de vitrages à couches en France

Les orientations retenues à l'issue des tables rondes du Grenelle de l'environnement à l'automne 2007 ont amorcé la mutation écologique de la France. Dans le secteur du bâtiment, les nouvelles réglementations environnementales, dans le cadre des lois Grenelle 1 et 2, ont imposé aux métiers du bâtiment un renouvellement des techniques, des produits et des pratiques.

La réglementation thermique a été renforcée dès 2012 (RT 2012), autour du bâtiment basse consommation (BBC), avec pour objectif de limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments, en suscitant une évolution technologique et industrielle significative pour toutes les filières du bâti et des équipements et un très bon niveau de qualité énergétique du bâti.

Les évolutions en cours concernent la RT 2020 qui sera applicable à toutes les constructions neuves à partir de fin 2020. Elle a pour objectif la mise en œuvre du concept de BEPOS, pour bâtiments à énergie positive, pensé dans le cadre du Plan bâtiment durable. Ils sont ainsi qualifiés car ils produisent plus d'énergie (chauffage, électricité...) qu'ils n'en consomment pour fonctionner.

Dans le neuf, la RT 2012 est applicable à tous les permis de construire déposés depuis le 1^{er} janvier 2013. Pour les bâtiments existants, la RT 2012 s'applique aux bâtiments résidentiels et tertiaires existants, à l'occasion de travaux de rénovation prévus par le maître d'ouvrage.

En rénovation, l'objectif est d'assurer une amélioration significative de la performance énergétique du bâtiment existant lorsqu'un maître d'ouvrage entreprend des travaux susceptibles d'apporter une telle amélioration. Dans le cas d'une rénovation globale un objectif de performance globale pour le bâtiment rénové doit être respecté. Dans le cas de rénovation partielle, d'installation ou de remplacement d'un élément du bâtiment (pose d'une isolation ou d'une fenêtre, changement de chaudière), la réglementation définit une performance minimale pour l'élément remplacé ou installé.

L'isolation thermique de l'enveloppe du bâti, et donc des fenêtres et parois vitrées est, avec la gestion optimisée de l'énergie un des postes clés pour le respect des objectifs de performance énergétique à l'échelle du bâtiment.

Cette évolution du marché des fenêtres vers des produits de plus en plus performants n'est pas nouvelle ; les menuisiers - fabricants et/ou poseurs – disposent depuis une trentaine d'années, avec les fenêtres à double vitrage, d'une solution d'amélioration de l'isolation thermique et acoustique efficace. Ainsi les vitrages simples (une feuille de verre) ont fait progressivement place à des vitrages doubles voire triples, en très large majorité sur les nouveaux projets.

Avec les contraintes liées à la RT 2012, depuis une dizaine d'années les vitrages faible émissivité de plus en plus performants tendent à se généraliser dans le neuf et plus largement dans les bâtiments existants, en rénovation.

En 2018, la quasi-totalité des vitrages commercialisés et installés sont au moins doubles et contiennent une couche faible émissivité, pouvant être associée à d'autres couches comme le contrôle solaire pour la réduction des apports solaires (optimisation de la climatisation par exemple). Un des principaux moteurs du marché de la fenêtre aujourd'hui est la rénovation énergétique des bâtiments existants : 60% des fenêtres produites en France sont destinées au secteur de la rénovation thermique.

Le verre simple est utilisé, seul, de façon rarissime. Seules des applications comme les marquises ou les verrières ne requièrent pas un vitrage isolant ; c'est le cas aussi pour la rénovation de monuments historiques ou des rénovations spécifiques à bas coûts. Le verre simple ou feuilleté peut être utilisé dans les façades double-peau (verre simple ou feuilleté associés à un vitrage isolant).

Les vitrages faible émissivité tendent donc à se généraliser à l'ensemble des bâtiments existants sur le territoire. Ces performances d'isolation thermique sont dues aux couches en partie métallisées présentes dans les vitrages.

2.6 - Caractéristiques électromagnétiques d'un vitrage multicouches

Les paramètres qui influent sur le niveau d'affaiblissement des ondes électromagnétiques à la traversée d'une paroi constituée de plusieurs couches sont :

- Les grandeurs électromagnétiques des différents matériaux constituant la paroi :
 - Conductivité électrique (S/m)
 - Permittivité diélectrique relative
- L'épaisseur des couches
- L'angle d'incidence de l'onde sur la paroi
- L'orientation des champs électrique et magnétiques incidents (polarisation de l'onde incidente)

On peut distinguer des couches fortement affaiblissantes, caractérisées par une valeur élevée de conductivité électrique (matériaux conducteurs) et les couches faiblement affaiblissantes caractérisées par une faible valeur de conductivité électrique (matériaux très peu ou pas du tout conducteurs). Un matériau conducteur est caractérisé par l'épaisseur de peau au-delà de laquelle le matériau est parfaitement réfléchissant ; le champ incident générant des courants surfaciques qui se propagent sur la surface du matériau. La valeur de l'épaisseur de peau dépend de la conductivité du métal et de la fréquence de propagation de l'onde incidente.

Les vitrages à faible émissivité sont un empilement de couches de verre et de couches à base de métaux ou d'oxydes métalliques. Le verre est un matériau diélectrique très peu conducteur. Sa permittivité diélectrique relative vaut entre 1 et 10, avec une très faible conductivité électrique (0,01 à 0,1 S/m).

Selon les modèles théoriques de transmission à travers des matériaux multicouche, compte tenu des caractéristiques diélectriques, ces couches de verres génèrent un affaiblissement relativement faible, de l'ordre de quelques dB dans le domaine des radiofréquences, avec des variations relatives dépendant des épaisseurs des différentes couches et de la fréquence de propagation de l'onde incidente, associées à un phénomène de multi réflexions à l'intérieur du matériau.

Les couches contenant du métal ou des oxydes métalliques ont une conductivité électrique élevée, entre 10^7 et 10^8 S/m ; la valeur de la conductivité dépend du type de métal. Depuis l'apparition des vitrages à couches de deuxième génération, l'argent est le métal le plus présent dans les couches faible émissivité (conductivité électrique d'environ 6×10^7 S/m). Les autres métaux cités par les fabricants sont le cuivre, l'or, l'aluminium. Dans les couches à base d'oxydes métalliques, on trouve aussi l'indium, le molybdène, le gallium, le bore, le tungstène, le zirconium, l'étain, le titane, etc.

L'épaisseur des couches métallisées dans un vitrage à faible émissivité varie de quelques nm (une seule couche) à 200 ou 300 nm (superposition de couches métalliques, céramiques, etc.). Cela reste très inférieur à l'épaisseur de peau des métaux, qui vaut de l'ordre de plusieurs μm dans le domaine des radiofréquences (entre quelques centaines de MHz quelques dizaines de GHz). Ainsi ces couches métallisées ne sont pas des blindages parfaits vis-à-vis des ondes électromagnétiques mais doivent néanmoins générer des pertes en transmission élevées dans ces bandes de fréquences.

3 - SELECTION D'ECHANTILLONS

L'objectif de la campagne de mesures est d'estimer la variabilité de l'atténuation en transmission des vitrages actuellement vendus et installés dans le neuf et en rénovation. Il s'agit donc d'avoir un ensemble d'échantillons représentatifs des solutions techniques disponibles sur le marché. Les échantillons ont été achetés dans trois entreprises de vitrerie

de la région de Grenoble, après avoir échangé indépendamment avec chacune sur les besoins et les critères de sélection :

- Avoir des modèles provenant de différents fabricants de vitrages
- Avoir différents modèles de chaque fabricant : type de couche (faible émissivité 1^{ère} et 2^{ème} génération, couches de contrôle solaire), épaisseur, couleur
- Sélectionner des modèles parmi les plus vendus actuellement

Les produits vendus en très grande majorité sont des doubles vitrages à couches faible émissivité. Ils constituent donc la majorité des échantillons sélectionnés. Des vitrages « ancienne génération » ont été également sélectionnés : vitrages simples et doubles sans couche, feuilletés ou non. Des triples vitrages à couches ont également été sélectionnés.

Ainsi 25 échantillons ont été achetés chez trois fournisseurs différents. Les quatre principaux industriels fabricants de verre sont représentés : Saint Gobain, Pilkington, Guardian et AGC.

La taille de chaque échantillon est de 1,20 m², ce qui permet une surface utile de mesure de 1 m² lorsque l'échantillon est placé sur le banc d'essai.

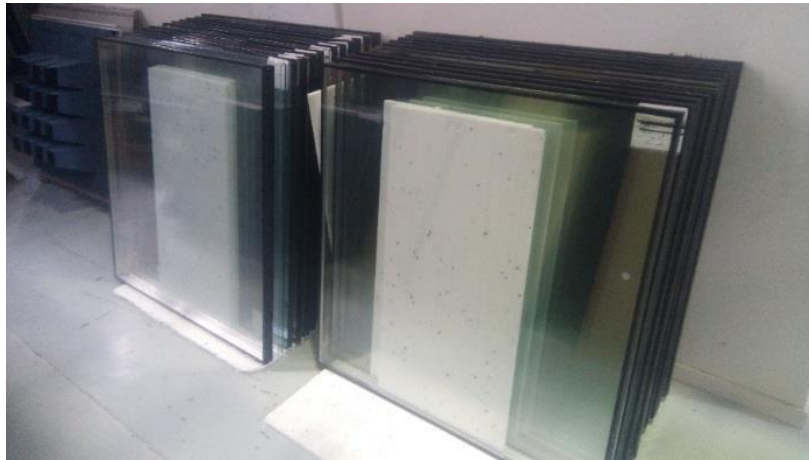


Figure 3-1 : les échantillons de vitrages sélectionnés

4 - MESURES DES PERTES EN TRANSMISSION

4.1 - Procédure de mesures

Initialement, il était prévu de mesurer l'indice d'affaiblissement en champ diffus des échantillons de vitrages. Ces mesures, réalisées en cages réverbérantes couplées, permettent de connaître la valeur de l'affaiblissement pour un champ électromagnétique incident moyenné sur l'ensemble des angles d'incidence et sur l'ensemble des polarisations.

Compte tenu de l'indisponibilité du laboratoire, et en accord avec l'ANFR, un banc de mesure en espace libre a été adapté et utilisé, afin de caractériser les pertes en transmission de l'ensemble des échantillons de vitrages, pour un angle d'incidence et une polarisation donnés du champ incident.

Les mesures de perte en transmission sont réalisées conformément à la norme EN1000-5-7¹, à partir de mesures relatives du paramètre S_{21} entre une antenne d'émission et une antenne de réception :

- mesure du S_{21} entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception, sans échantillon sous test : $S_{21} | \text{à vide}$
- mesure du S_{21} avec l'échantillon sous test placé entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception : $S_{21} | \text{échantillon}$

Le coefficient de pertes en transmission est donné par :

$$\text{Pertes en transmission (dB)} = S_{21} | \text{à vide (dB)} - S_{21} | \text{échantillon (dB)}$$

Les équipements utilisés en émission et transmission sont donnés dans la Table 4-1.

Analyseur de réseau vectoriel	Anritsu MS46522B-20 2 ports 50 kHz – 20 GHz Puissance émise : +20dBm
Antennes d'émission	Antenne cornet A-Info LB 7180 700 MHz – 18 GHz
Antennes de réception	Antenne cornet A-Info LB 7180 700 MHz – 18 GHz
Câbles hyperfréquences	Câbles Hytem DC-18 GHz

Table 4-1 : matériel pour la mesure des pertes en transmission

¹ EN61000-5-7: Installation and mitigation guidelines - Degrees of protection by enclosures against electromagnetic disturbances

La bande de fréquences mesurée est de 700 MHz à 20 GHz. Les valeurs mesurées entre 18 GHz et 20 GHz sont données à titre indicatif puisque situées en dehors du domaine de validité des câbles et des antennes d'émission et de réception.

Les valeurs des fréquences sont fixées avec un espacement entre fréquences inférieur à 1%.

Une calibration « full two port » est réalisée avant chaque série de mesures. Le plan de référence est placé à l'extrémité des câbles d'émission et de réception, dans le plan de l'échantillon sous test.

L'échantillon sous test a une surface utile de 1 m².

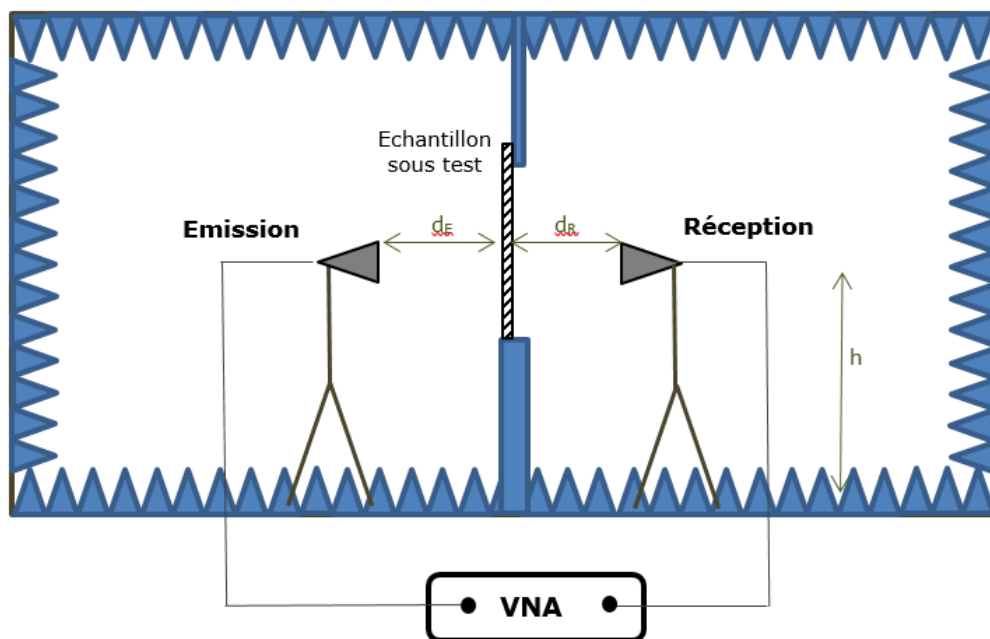


Figure 4-1 : schéma du banc de mesure - $d_E = d_R = 45 \text{ cm}$; $h = 1,5\text{m}$

Pour l'ensemble des échantillons, les mesures sont réalisées en incidence normale pour deux polarisations : polarisation horizontale et polarisation verticale. Pour quelques échantillons les mesures sont réalisées pour les angles d'incidence de 30° et 60°, selon les deux polarisations.

L'incertitude sur la mesure des pertes en transmission est estimée à 2,5 dB, à partir de campagnes de mesure de répétabilité et reproductibilité réalisées sur plusieurs échantillons (plaques pleines, ouverture et échantillons avec une plage d'affaiblissements représentatifs).

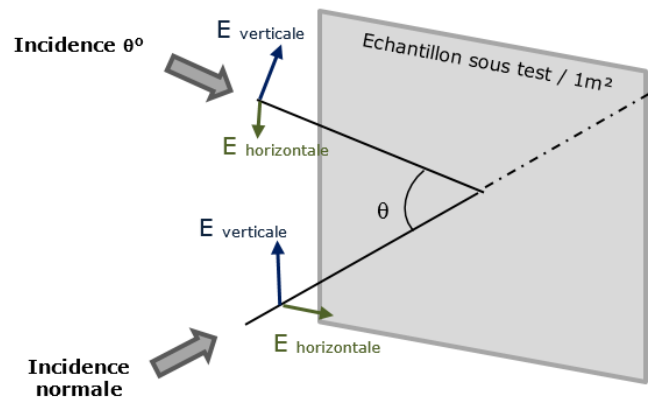


Figure 4-2 : angle d'incidence et polarisation du champ incident

4.2 - Résultats de mesure de pertes en transmission

Les résultats sont présentés dans la bande de fréquences étendue 700 MHz – 20 GHz et dans la bande restreinte 700 MHz – 7 GHz, pour plus de lisibilité par rapport aux bandes de fréquences utilisées actuellement par les réseaux de télécommunications. Il faut noter que les résultats de mesures réalisées entre 18 GHz et 20 GHz sont donnés à titre indicatif (limite du domaine de validité des antennes utilisées).

L'objectif de l'étude est de caractériser la variabilité des atténuations de différents vitrages du marché. Il ne s'agit pas de comparer des modèles et technologies de vitrages. Ainsi les noms des modèles et des fabricants n'apparaissent pas dans les résultats présentés ci-dessous.

4.2.1 - Mesures en incidence normale

Sur la Figure 4-3 sont donnés les pertes en transmission pour trois échantillons (un verre simple et deux doubles vitrages), pour chacune des deux polarisations.

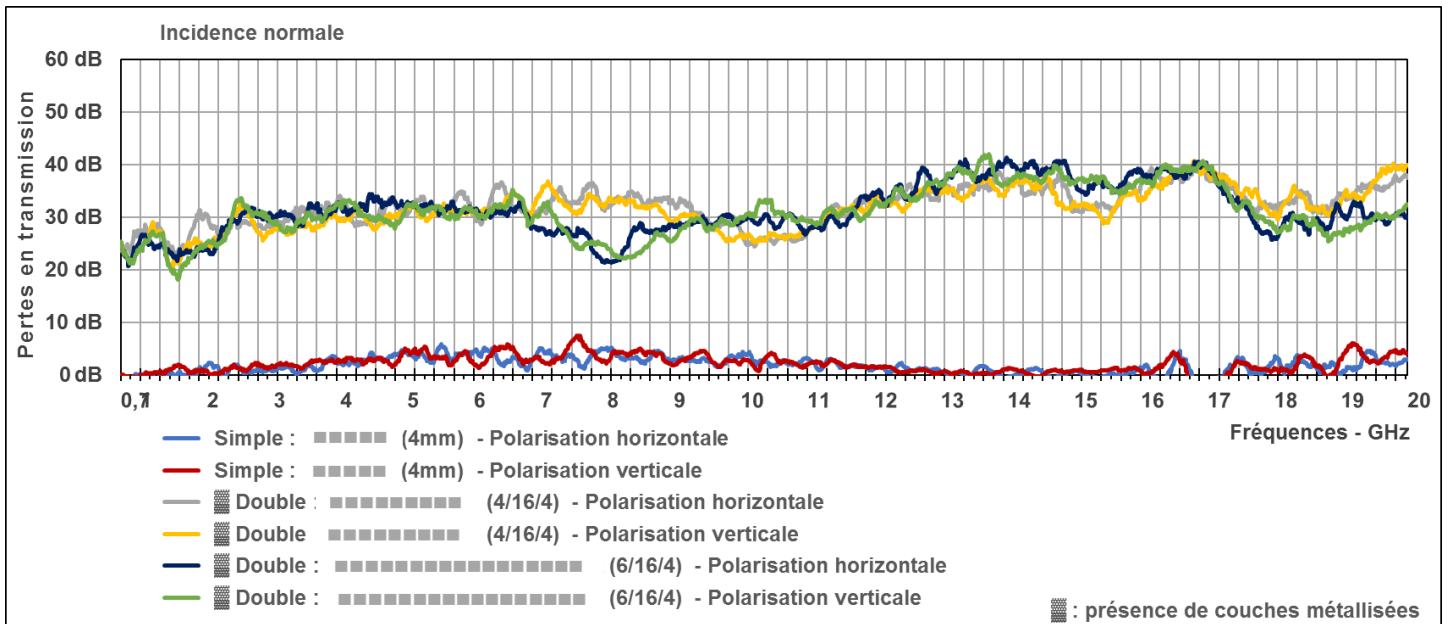


Figure 4-3 : influence de la polarisation du champ incident, en incidence normale

Ces résultats sont représentatifs de l'ensemble des résultats de tous les échantillons : en incidence normale la polarisation du champ incident a peu d'influence sur le coefficient de pertes en transmission. Ce résultat est cohérent avec la structure homogène et isotrope des vitrages et de leurs différentes couches.

Les pertes en transmission, mesurées pour une incidence normale et en polarisation horizontale, de l'ensemble des échantillons sélectionnés sont données sur la Figure 4-4 et la Figure 4-5. Il apparaît de façon évidente que la présence de couches métallisées dans un vitrage a un impact très important sur l'affaiblissement en transmission.

Les vitrages sans couche (simple ou double) ont des pertes en transmission inférieures à 10 dB sur l'ensemble de la bande de fréquences. La présence de couches métallisées génère des pertes en transmission comprises entre 20 et 50 dB.

Les vitrages les plus affaiblissants dans la sélection retenue sont les échantillons de triple vitrage, qui comportent des couches faible émissivité en face 2 et en face 5 (deux modèles de fabricants différents) ainsi qu'un double vitrage feuilleté à couches.

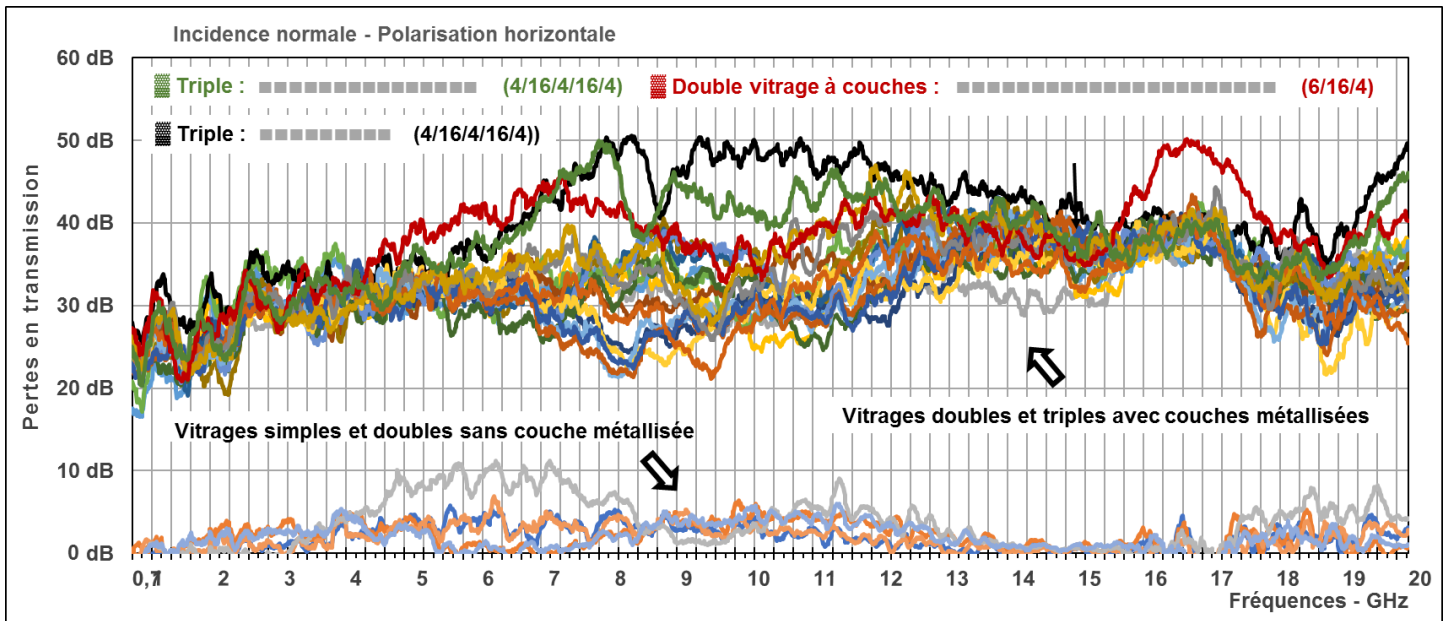


Figure 4-4 : résultats des mesures de pertes en transmission en fonction de la fréquence (entre 700 MHz à 20 GHz)

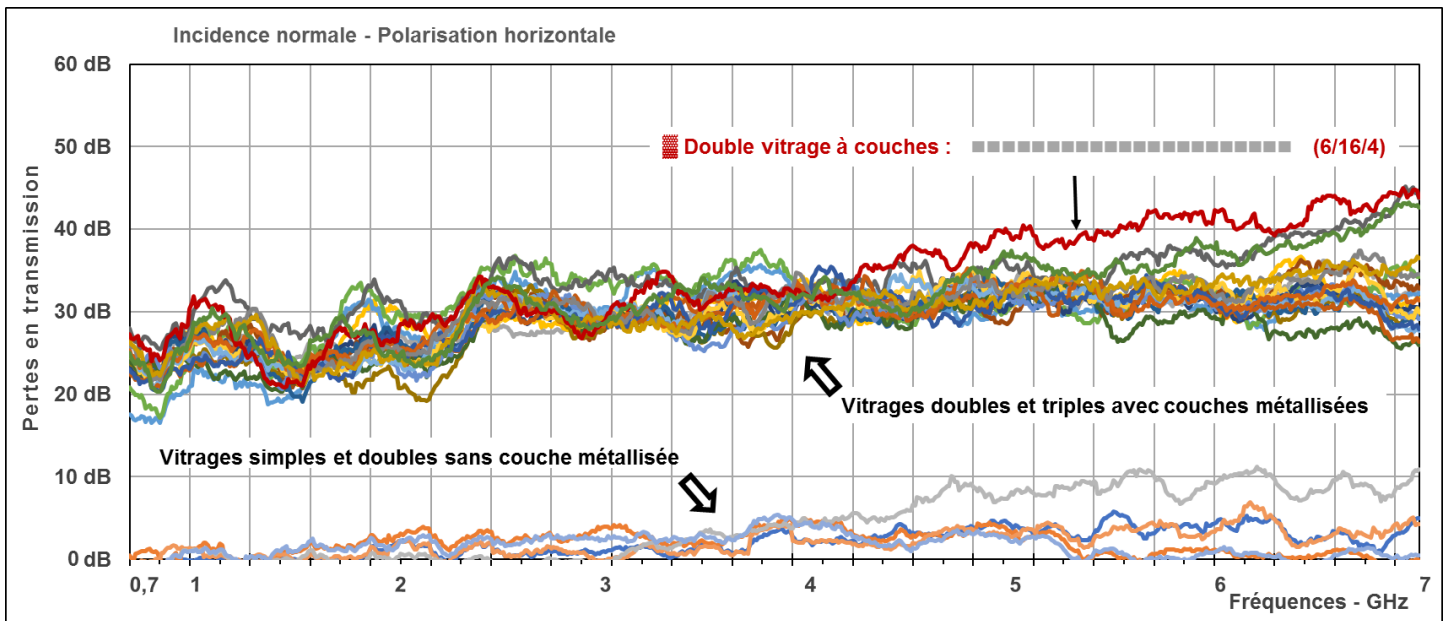


Figure 4-5 : résultats des mesures de pertes en transmission en fonction de la fréquence (entre 700 MHz à 7 GHz)

Les variations des pertes en transmission en fonction de la fréquence peuvent être localement importantes pour certains échantillons. Ces variations sont dues à la structure multicouche des vitrages et aux phénomènes d'interférences, d'atténuations et de multi réflexions à l'intérieur du vitrage. Leur amplitude dépend des paramètres d'épaisseurs de chaque couche (verre, gaz, couches fines métallisées ou non) et des différentes valeurs de permittivité diélectrique et conductivité électrique, qui dépendent de la fréquence.

Au-delà de ces variations locales, il est intéressant d'observer le comportement fréquentiel moyen des pertes en transmission sur l'ensemble du spectre mesuré.

Sur les Figure 4-6 à Figure 4-10 sont représentées entre 700 MHz et 7 GHz les pertes en transmission de sous ensemble d'échantillons : les doubles vitrages avec couche faible émissivité, les vitrages sans couches faible émissivité, les vitrages feuilletés, les vitrages avec couche de contrôle solaire, etc.

La dispersion entre les modèles (différents fabricants, technologies et épaisseurs) est limitée, avec un comportement fréquentiel semblable : la valeur d'atténuation est liée à la présence de couches métallisées dans la structure du vitrage. L'épaisseur des couches de verres ou la présence de verre feuilleté a peu d'influence sur le comportement global de l'atténuation.

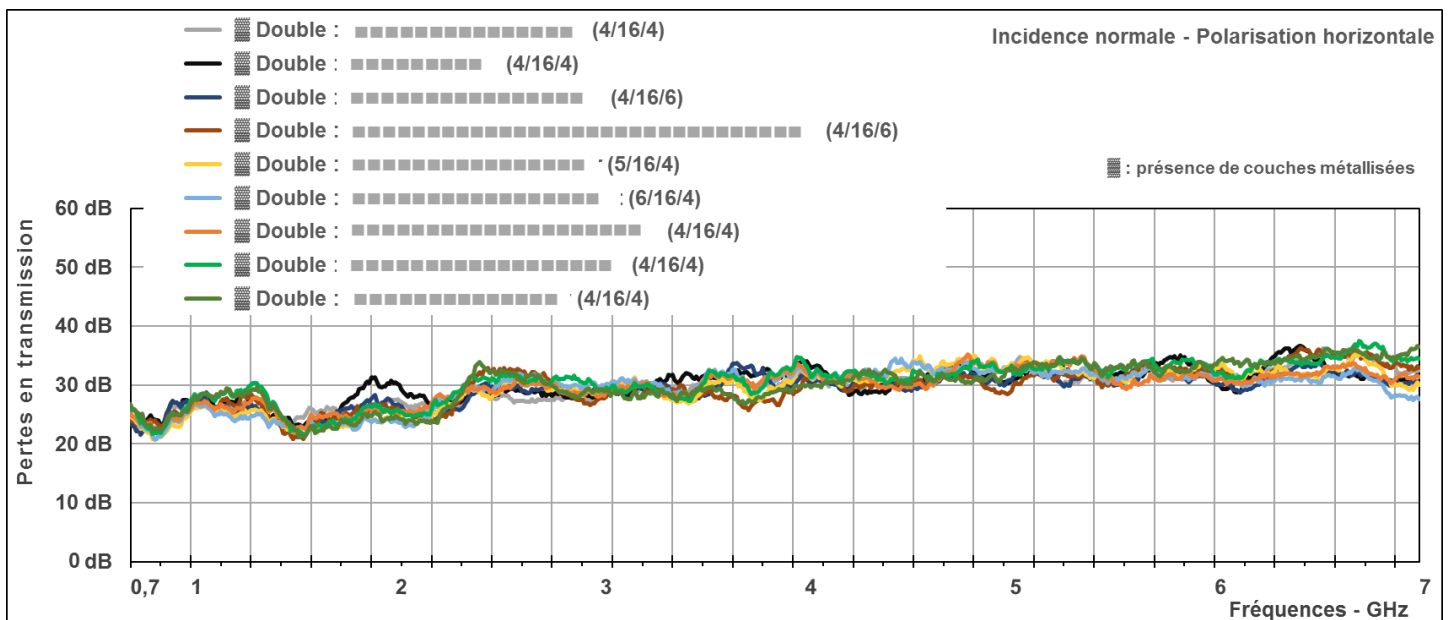


Figure 4-6 : pertes en transmission mesurées pour les doubles vitrages à couche faible émissivité

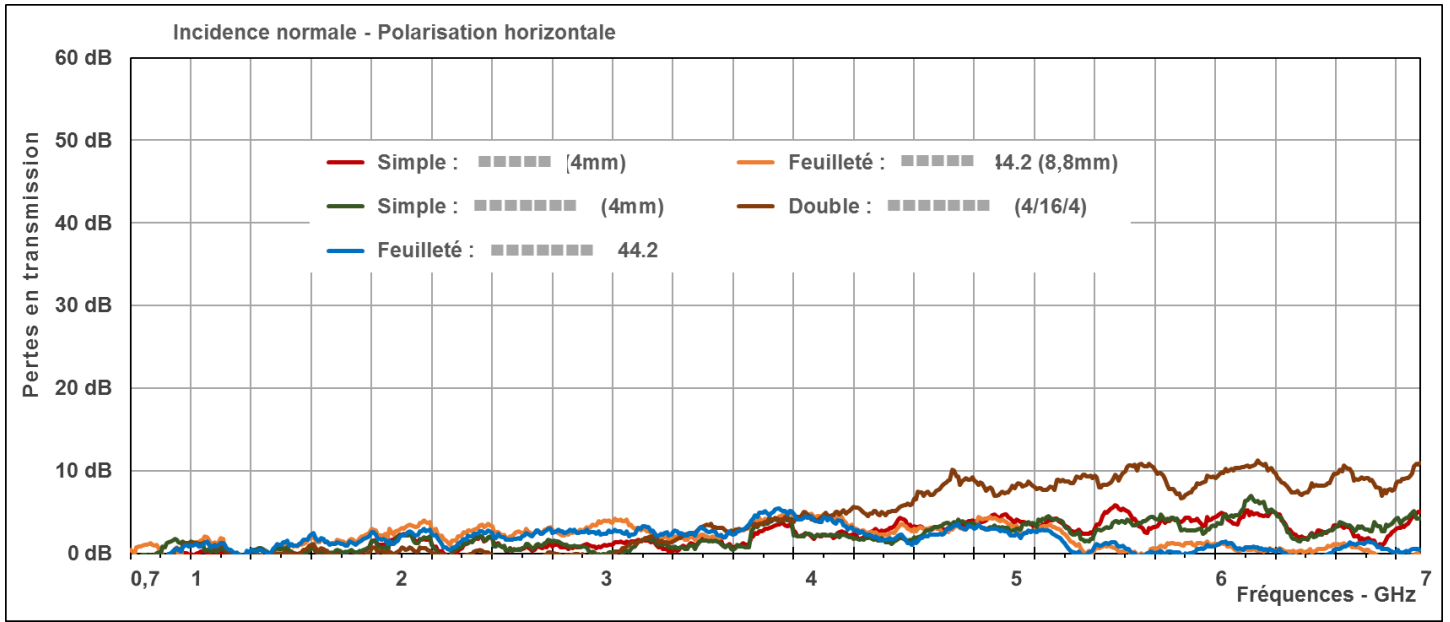


Figure 4-7 : pertes en transmission mesurées pour les vitrages sans couche faible émissivité

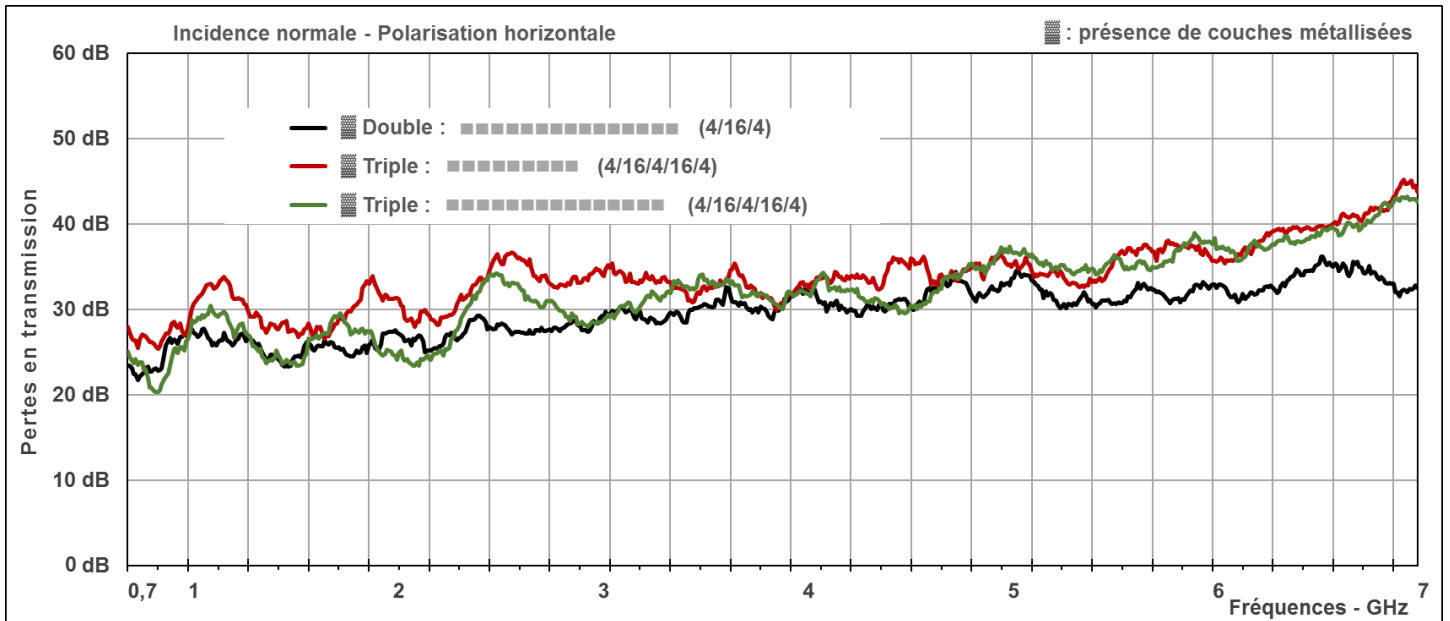


Figure 4-8 : pertes en transmission mesurées pour des triples vitrages (avec couches faible émissivité)

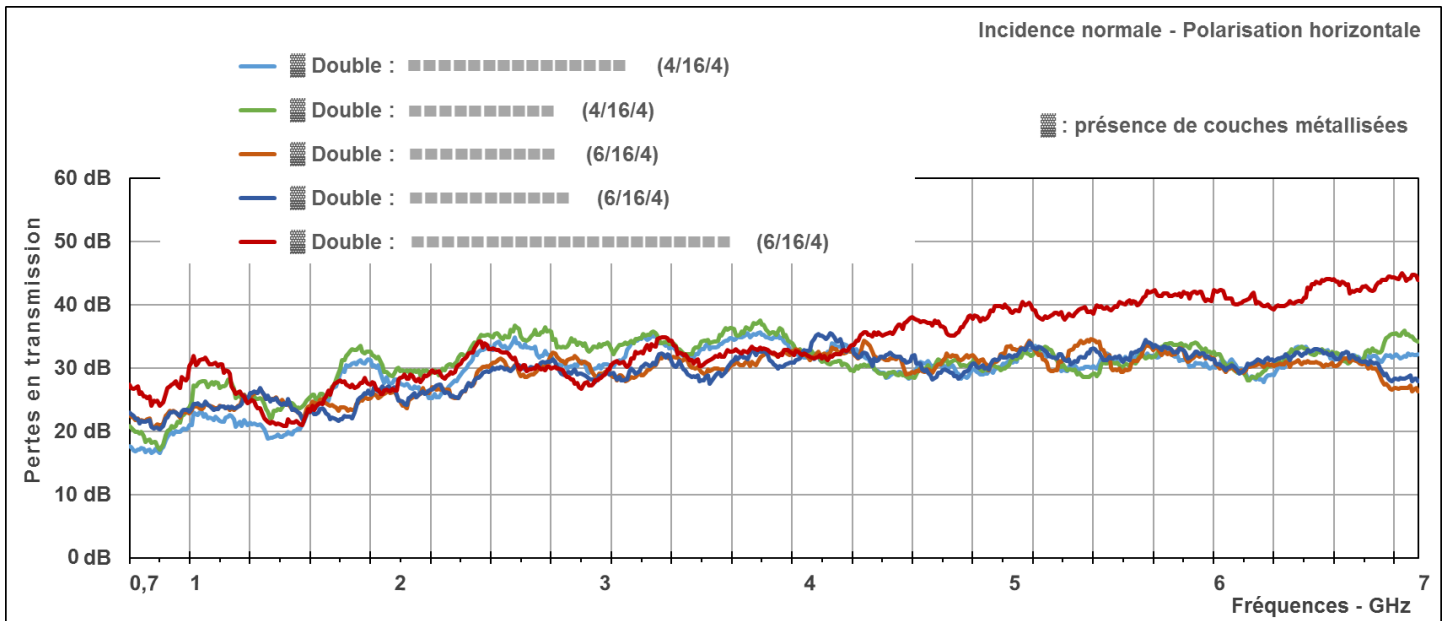


Figure 4-9 : pertes en transmission mesurées pour des doubles vitrages avec couche faible émissivité et contrôle solaire

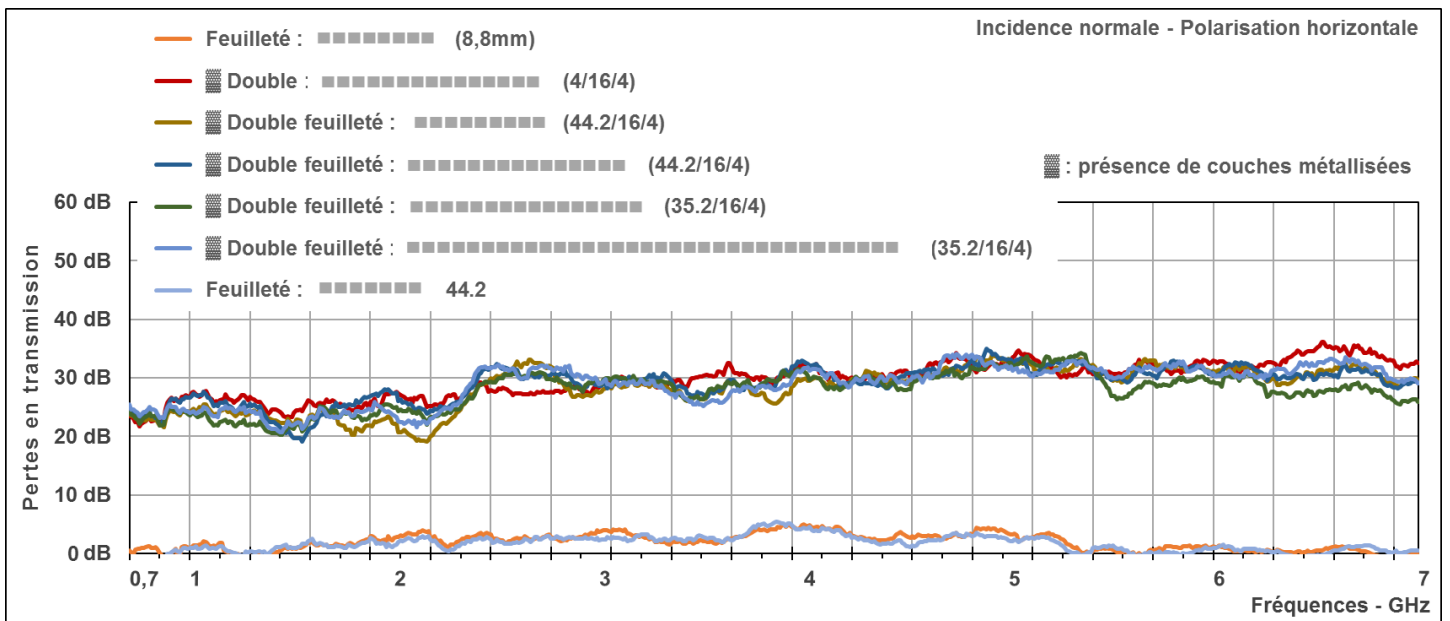


Figure 4-10 : pertes en transmission mesurées pour des vitrages contenant un verre feuilleté

4.2.2 - Influence de l'angle d'incidence

Pour plusieurs échantillons (vitrage sans couche et avec couches) des mesures ont été réalisées pour deux angles d'incidence du champ incident : 30° et 60°. Les mesures n'ont pas pu être réalisées en incidence rasante (80 / 90°), configuration dans laquelle l'affaiblissement augmente fortement du fait de l'augmentation de la taille de la surface d'impact du faisceau incident sur la paroi. Il faudrait pour cela un ensemble d'antennes extrêmement directives qui couvrent toute la bande de fréquences de mesure, ce qui n'est

pas techniquement réalisable. L'angle d'ouverture du faisceau des antennes cornets utilisées ne permet pas d'aller au-delà d'un angle d'incidence de 60°.

Les résultats sont illustrés sur les Figure 4-11 à Figure 4-16 pour un vitrage simple (verre 4mm), un double vitrage à couche faible émissivité et le double vitrage le plus affaiblissant de la sélection.

Lorsque la direction du champ incident n'est plus perpendiculaire à l'échantillon (cas de l'incidence normale), la polarisation du champ électrique a logiquement une influence sur la valeur des pertes en transmission.

Dans le cas d'un matériau diélectrique à très faible conductivité (vitrage simple - Figure 4-11 et Figure 4-12), les résultats sont conformes avec les modèles théoriques de transmission de paroi : le champ incident en polarisation horizontale présente un affaiblissement plus élevé qu'en polarisation verticale ; cet affaiblissement augmente avec l'angle d'incidence, en moyenne sur l'ensemble de la bande de fréquences entre 2 et 3 dB pour une incidence de 30°, entre 5 et 7 dB pour une incidence de 60°.

Dans le cas de matériau à forte conductivité (présence de couches métallisées dans le vitrage - Figure 4-13 à Figure 4-16), ce phénomène est moins présent et atténué par la valeur élevée de l'affaiblissement du vitrage, quelle que soit la polarisation et l'angle d'incidence. Ainsi plus les pertes en transmission sont élevées, plus l'effet de la polarisation et de l'angle d'incidence sur ces pertes sont faibles.

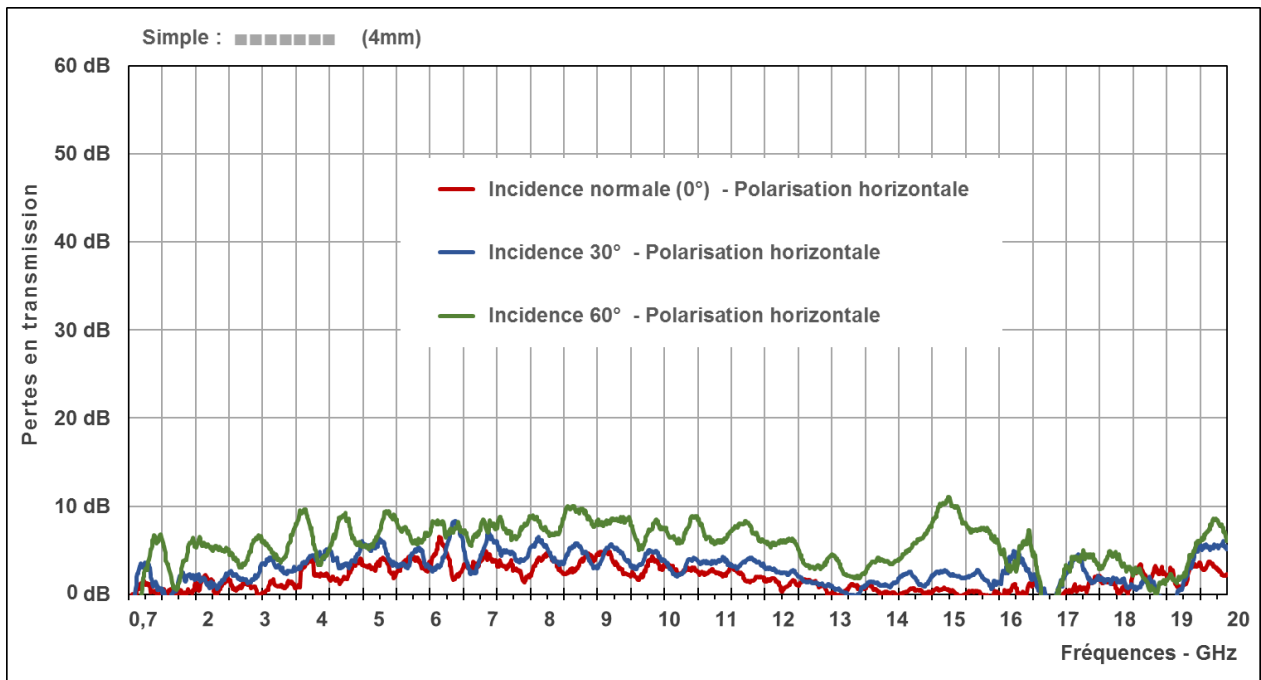


Figure 4-11 : pertes en transmission mesurées pour différents angles d'incidence – polarisation horizontale - vitrage simple

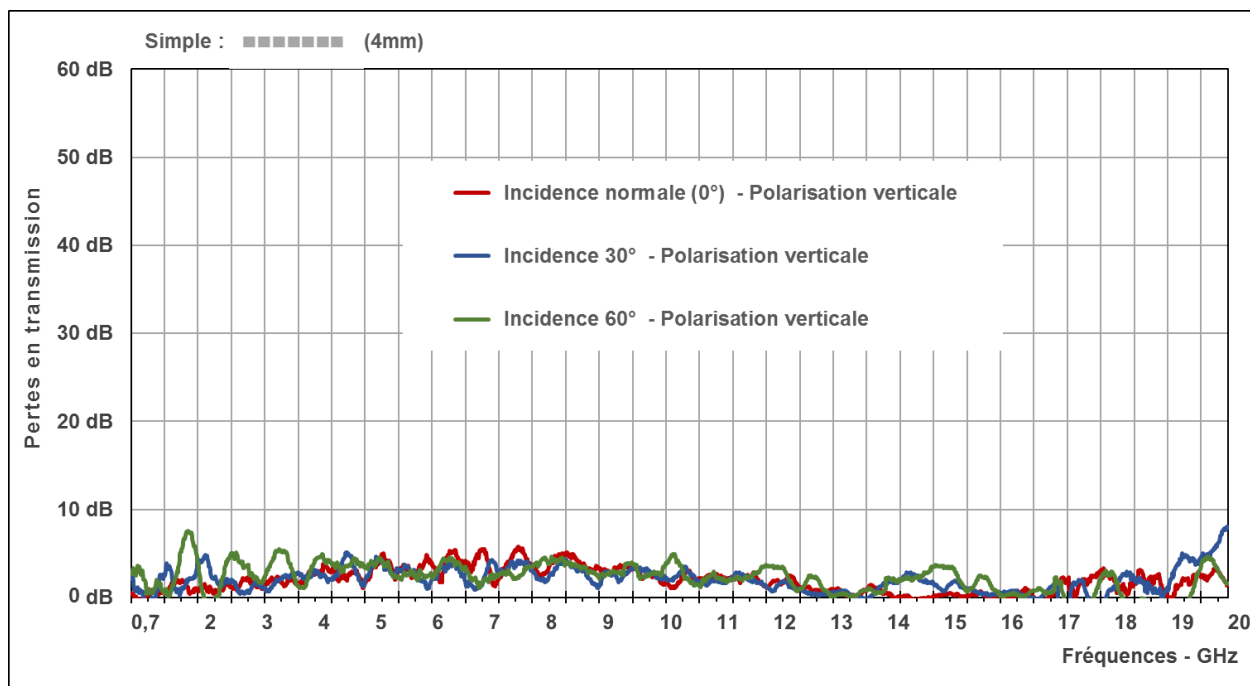


Figure 4-12 : pertes en transmission mesurées pour différents angles d'incidence – polarisation verticale - vitrage simple

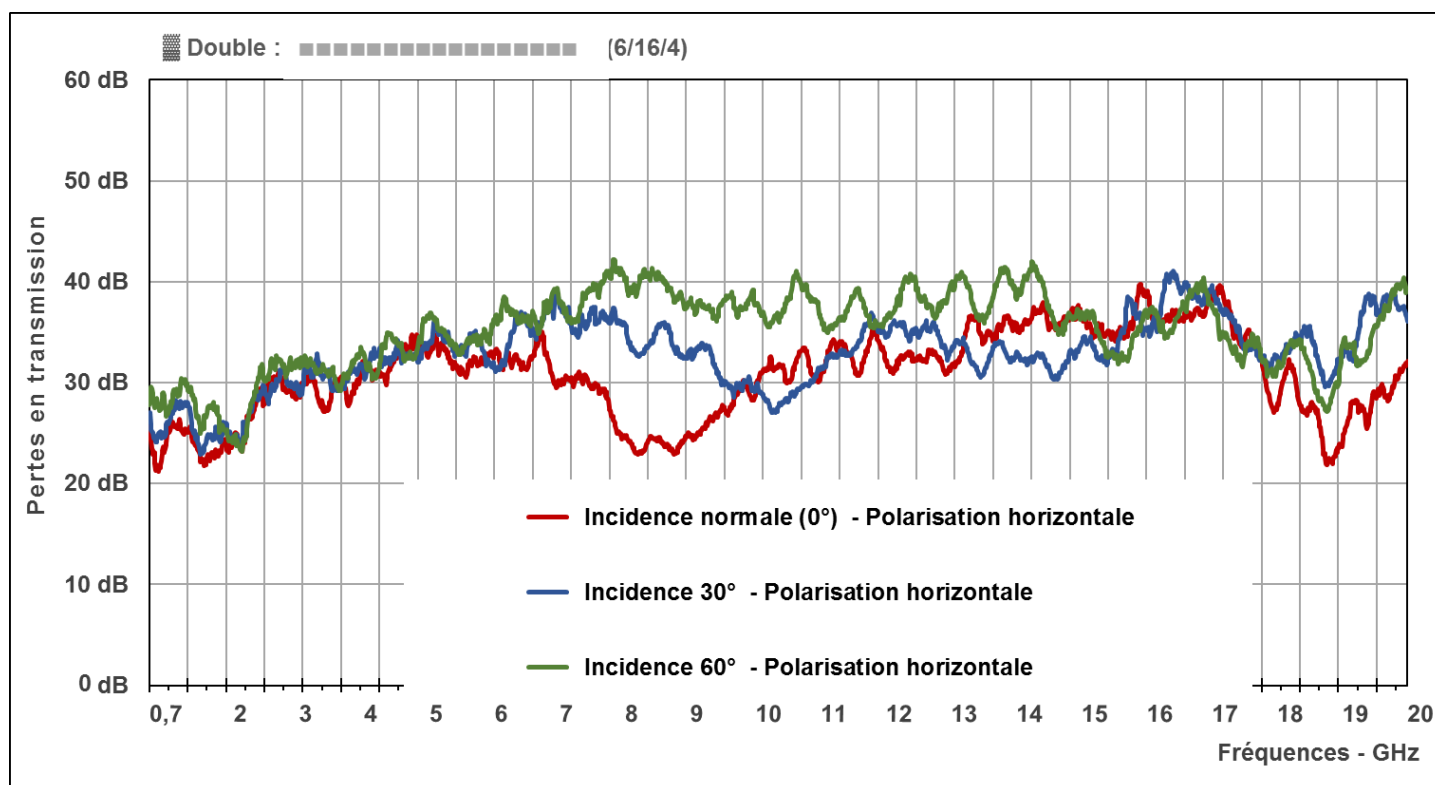


Figure 4-13 : pertes en transmission mesurées pour différents angles d'incidence – polarisation horizontale – double vitrage à couche faible émissivité

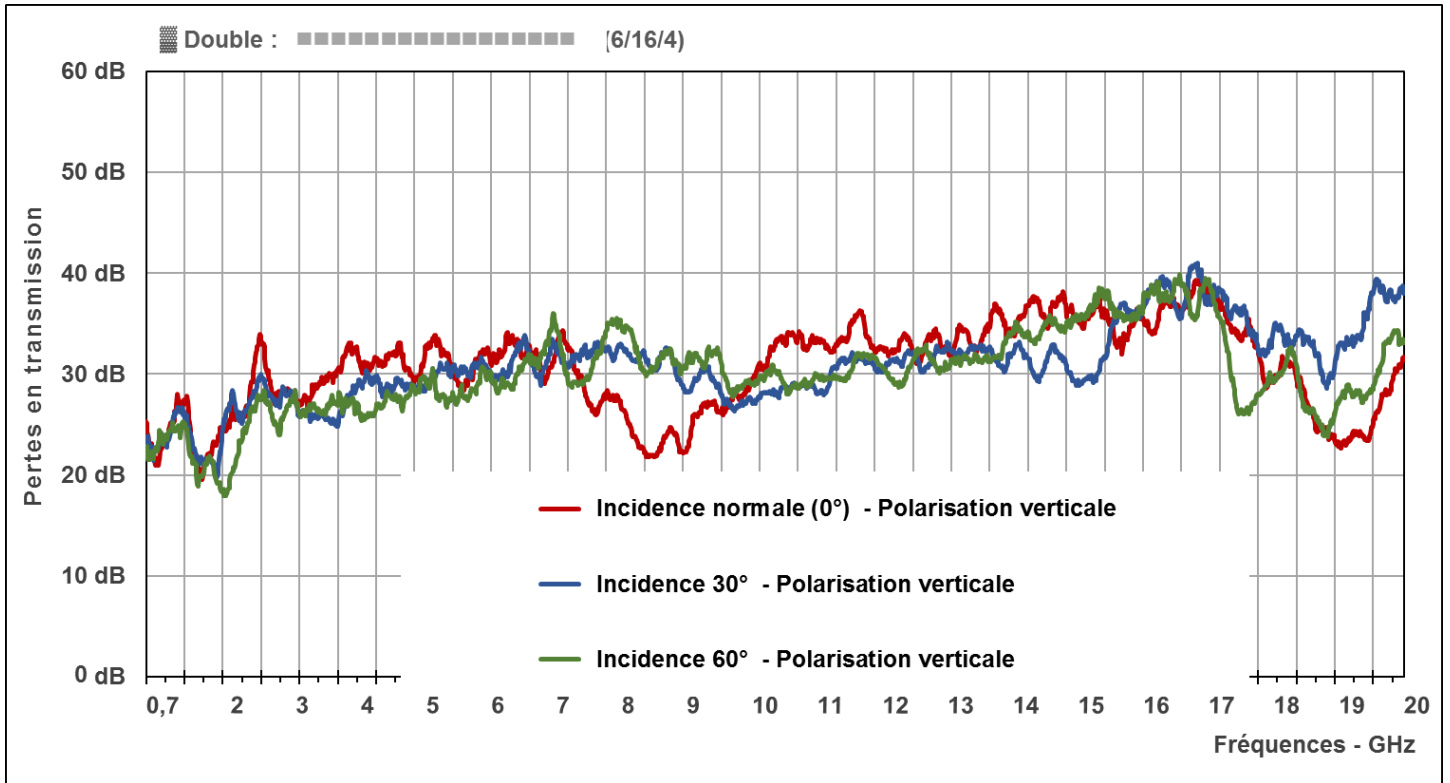


Figure 4-14 : pertes en transmission mesurées pour différents angles d'incidence – polarisation verticale – double vitrage à couche faible émissivité

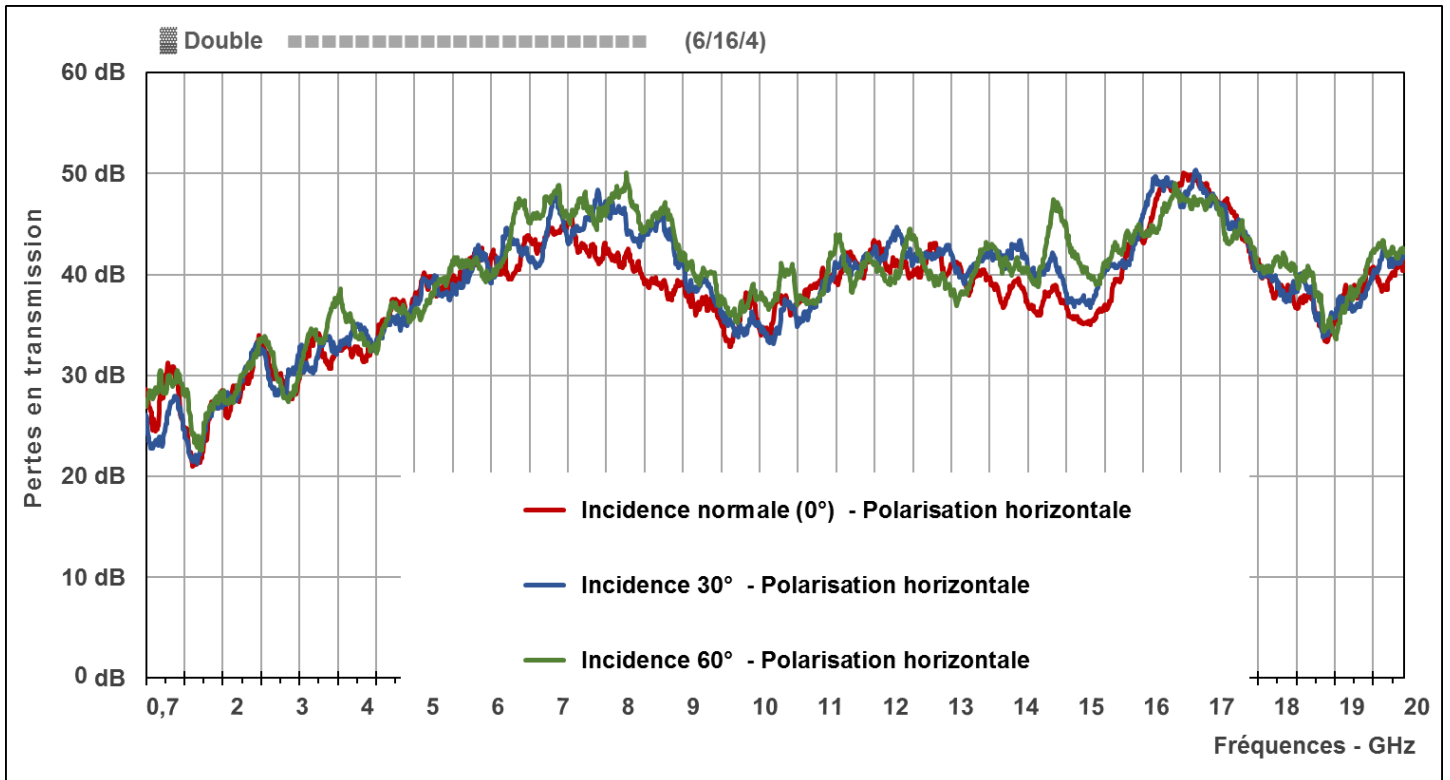


Figure 4-15 : pertes en transmission mesurées pour différents angles d'incidence – polarisation horizontale – double vitrage à couche faible émissivité et contrôle solaire

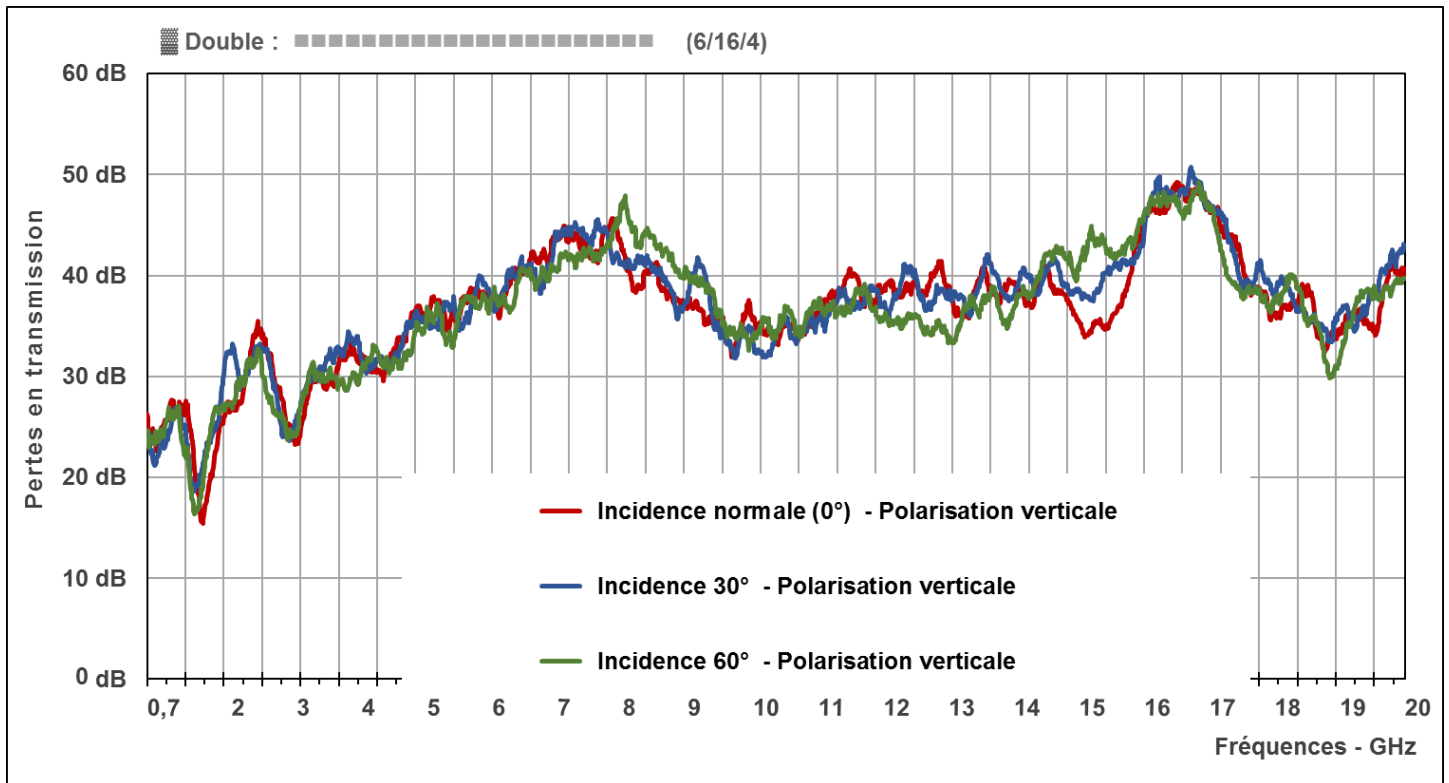


Figure 4-16 : pertes en transmission mesurées pour différents angles d'incidence – polarisation verticale – double vitrage à couche faible émissivité et contrôle solaire

4.2.3 - Synthèse des résultats de la campagne de mesures

Les résultats des mesures en laboratoire montrent des variations locales importantes des pertes en transmission en fonction de la fréquence, pour les différents échantillons. Ces variations sont dues principalement aux phénomènes de multi réflexions dans les différentes couches du vitrage (verres, dépôts métallisés) et à la diversité des caractéristiques des couches rencontrées : épaisseurs, permittivité diélectrique et de conductivité électrique.

Une analyse globale de l'ensemble des résultats de tous les échantillons sur la bande de fréquences 700 MHz – 20 GHz permet de conclure à l'impact très fort de la présence de couches métallisées ou à base d'oxyde métallisés sur l'affaiblissement du vitrage.

L'épaisseur d'un vitrage, l'épaisseur et le nombre de couches de verre le constituant (double, triple vitrage) ne sont pas des paramètres déterminants dans la valeur du niveau d'affaiblissement électromagnétique à la traversée du vitrage.

La présence de couches métallisées, et l'affaiblissement électromagnétique important qu'elles induisent, rendent l'influence de l'orientation du champ incident sur le vitrage (polarisation et angle d'incidence) beaucoup plus limité que dans le cas de vitrages sans couche à faible affaiblissement.

Le comportement global des pertes en transmission pour l'ensemble des échantillons mesurés est résumé dans la Table 4-2.

Fréquences	Vitrages sans couche (simple, double, feuilleté)	Vitrage faible émissivité (double, triple, feuilleté)
700 MHz – 5 GHz	0 à 10 dB	20 à 35 dB
5 GHz – 20 GHz		20 à 50 dB

*Table 4-2 : amplitude des pertes en transmission moyennées (polarisation, incidence, fréquence)
pour l'ensemble des échantillons mesurés*

5 - CONCLUSION

Avec l'évolution des réglementations thermiques et l'amélioration constante de l'isolation des bâtiments neufs et existants, les vitrages à faible émissivité se généralisent sur l'ensemble du parc de bâtiments en France.

Les technologies de ces vitrages évoluent, avec des performances d'isolation thermique croissantes, associées à d'autres caractéristiques : contrôle solaire, isolation acoustique, verre auto nettoyant, couleurs, etc. La très grande majorité des vitrages vendus et installés depuis une dizaine d'années sont des doubles vitrages à couches. Les performances thermiques sont assurées par l'ajout de couches métallisées dans les faces internes du double vitrage : métaux (majoritairement de l'argent dans les produits actuellement sur le marché) associés à des couches à base d'oxyde métallisés.

Des modèles de vitrages ont été sélectionnés et approvisionnés, afin d'avoir des échantillons représentatifs du marché actuel, qui propose une très grande diversité de produits : nombreux fabricants, différentes technologies de couches chez chaque fabricant, différentes épaisseurs, différents usages, etc.

L'affaiblissement électromagnétique de ces échantillons a été caractérisé en laboratoire, avec la mesure des pertes en transmission dans la bande de fréquences 700 MHz à 18 (20) GHz.

Ces mesures ont permis de quantifier l'affaiblissement des vitrages, d'estimer la dispersion entre les modèles et de comparer les doubles et triples vitrages à couches avec les vitrages d'ancienne génération (vitrage simple ou double sans couche).

La présence de couches métallisées génère un affaiblissement important du vitrage vis-à-vis des ondes électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences, entre 10 et 50 dB supplémentaires par rapport à un vitrage sans couche.

La présence de couches métallisées, et l'affaiblissement important associé, diminue fortement l'influence de l'orientation du champ incident (polarisation et angle d'incidence).

Il faut noter que des mesures en incidence rasante (angle d'incidence au-delà de 80°) n'ont pas pu être réalisées. Que ce soient pour des vitrages sans couche ou à couches, les pertes en transmission doivent fortement augmenter pour des incidences rasantes. Cela n'a pas pu être vérifié en laboratoire. De telles mesures seraient envisageables et plus pertinentes sur une façade complète in situ.

Ainsi, la généralisation des vitrages faible émissivité dans le parc immobilier génère un affaiblissement important, jusqu'à plusieurs dizaines de décibels, des ondes électromagnétiques radiofréquences. Cela diminue localement le niveau de champ reçu à l'intérieur des bâtiments depuis les émetteurs radioélectriques situés à l'extérieur.

Cette diminution du niveau de champ à l'intérieur des bâtiments peut localement impacter fortement la couverture et qualité de service des réseaux de téléphonie mobile. C'est le cas

depuis plusieurs années dans les constructions neuves (des solutions correctives de type répéteurs ou pico cellules sont installés dans certains bâtiments neufs) ; c'est de plus en plus fréquemment le cas à la suite de chantiers de rénovation et d'isolation sur des bâtiments existants.

La quantification plus précise de cet affaiblissement à l'échelle de la façade des bâtiments nécessiterait de prendre en compte l'ensemble de la paroi (murs pleins, fenêtre et vitrage) au travers de modélisations numériques ou de mesures in situ ou sur des cas représentatifs.