

Le Béton Intelligent

Michel MARDIGUIAN - m.mardiguan@orange.fr

Jean-Paul CARON-FELLENS – jean-paul.caron-fellens@orange.fr

06 64 74 25 57

AFCEM



Besoins de blinder de grands locaux

Durant des décennies, les locaux n'étaient protégés des champs RF que dans des cas très particuliers:

- Laboratoires de mesures ou de mises au point spécialisées.
- Locaux situés en site militaire utilisant des émetteurs puissants.
- Salles spéciales d'ambassades, de consulats, d'hôpitaux, etc.

Depuis la fin des années 90, apparition de besoins croissants de protection de grands bâtiments ($> 30\text{m}^2$), voire de bâtiments entiers contre :

- Menaces traditionnelles déjà connues.
- Armes radioélectriques modernes : HIRF, Ultra Wide Band pulses, faisceau concentré de micro-ondes de forte amplitude (Hi-Power Micro Waves).
- Les progrès technologiques ont rendu ces armes faciles à mettre en œuvre (attaques classiques ou terroristes).

Blinder des locaux de grandes dimensions ?

Faradisation par habillage hermétique 6 faces en tôle d'acier ou cuivre :

- coûteuse en matériaux et en main-d'œuvre.
- s'applique en second-œuvre, une fois le bâtiment principal hors sol.

Le Béton Intelligent (« Smart », ou « Intelligent » Concrete)

permet d'obtenir dès la construction avec des techniques affectant peu les méthodes traditionnelles, un bâtiment dont tout ou partie possède des performances de blindage largement suffisantes pour les besoins cités.

Présentation du Béton Intelligent

RAPPELS

$$\text{Performance d'un volume blindé} = \frac{\text{Champ dans la zone concernée sans le blindage}}{\text{Champ restant une fois le blindage réalisé}}$$

Ou, exprimé en décibels :

$$\text{Eff. (dB)} = 20 \log_{10} [E_1 \text{ (Volt/m)} / E_2 \text{ (Volt/m)}]$$

Soit :	Eff. (dB)	Facteur d'affaiblissement
	10dB	≈ 3
	20dB	10
	30dB	≈ 30
	40dB	10 etc...

On dit parfois plus simplement : Atténuation entre le champ « dehors » et le champ « dedans » (formulation moins rigoureuse).

Pour obtenir cette atténuation, la paroi doit être en matériau conducteur, de nature et d'épaisseur suffisantes pour le besoin exprimé.

Matériaux utilisés : 1 – Le béton

Béton ordinaire, ratio usuel ciment / sable = médiocre conducteur.

Néanmoins, l'effet de peau fait qu'à partir d'une certaine fréquence les ondes électromagnétiques pénètrent de moins en moins dans l'épaisseur de la paroi:

- En épaisseur suffisante le béton commence à les absorber.

La courbe A) montre l'atténuation par absorption d'un mur de béton homogène de 0,50 m (résistivité 300 Ω .m).

- Si l'on charge le béton avec des fibres d'acier en % convenable, la résistivité peut descendre à 30 Ω .m (courbe B).

Avec ce léger dopage, parfois utilisé en adjuvant de solidité structurelle, le béton qui était quasi-transparent aux ondes radio jusqu'à ≈ 100 MHz, commence à offrir une atténuation substantielle (courbe B) devient de plus en plus performant au-delà.

Reste le problème de son insuffisance pour $F < 100$ MHz.

Atténuation intrinsèque du béton

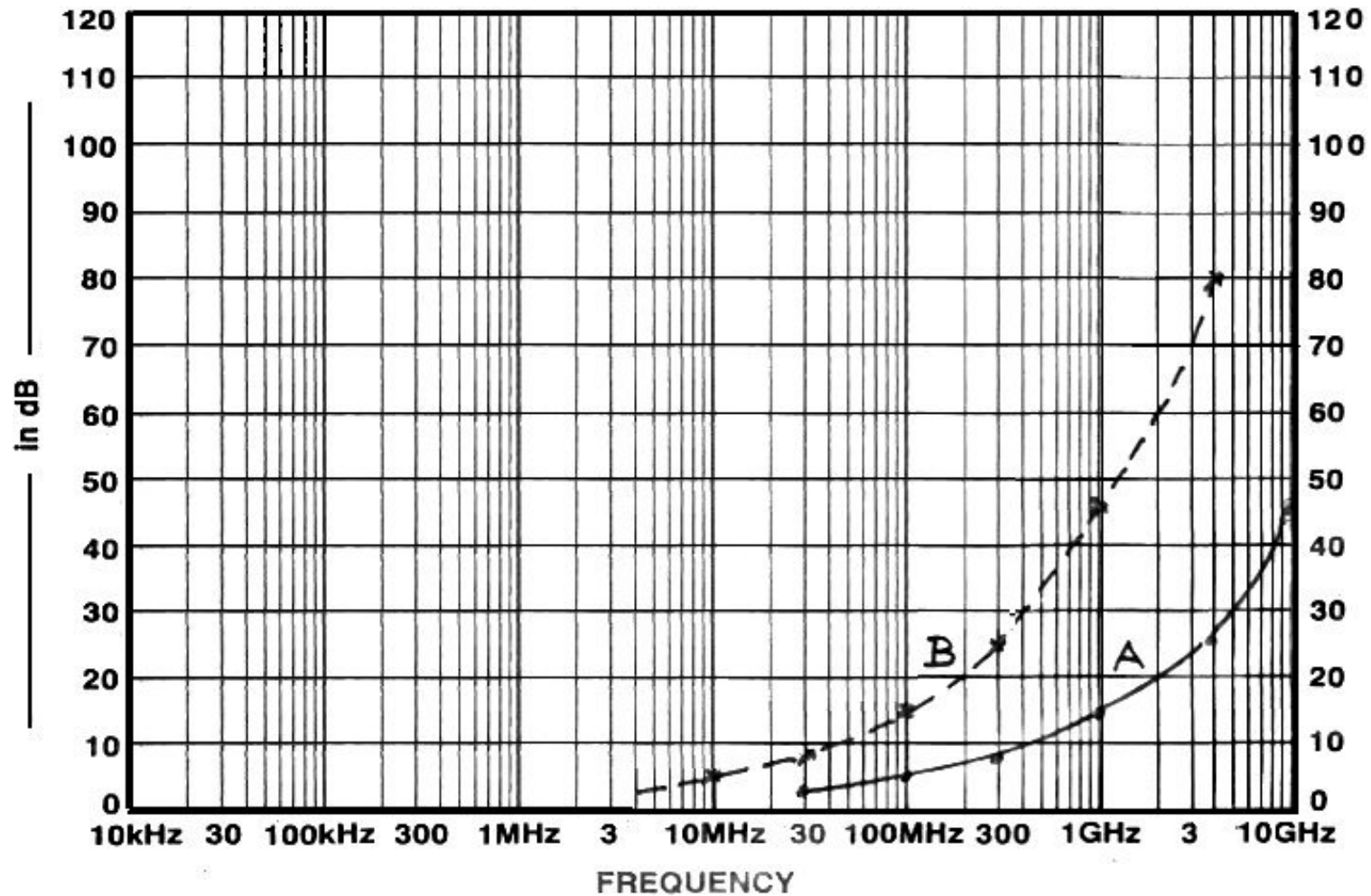


Fig. 1 Atténuations calculées par absorption d'un béton de 0,50m.

(A): béton ordinaire

(B): avec ajout de fibres acier.

Matériaux utilisés : 2 – Le grillage

Propriétés inverses au béton :

- Interface très conductrice

- Réfléchit fortement l'onde électromagnétique incidente grâce au changement abrupt d'impédance (\approx à la réflexion en optique)
- Mais quand F augmente, la longueur d'onde λ du champ incident se rétrécit, se rapprochant de la dimension de la maille \rightarrow l'efficacité du grillage diminue.
- Lorsque la maille $= \lambda/2$, elle se comporte en antenne accordée et le grillage laisse passer la totalité du champ. Au-delà, il restera quasi transparent (Fig. 2).

Atténuation du grillage

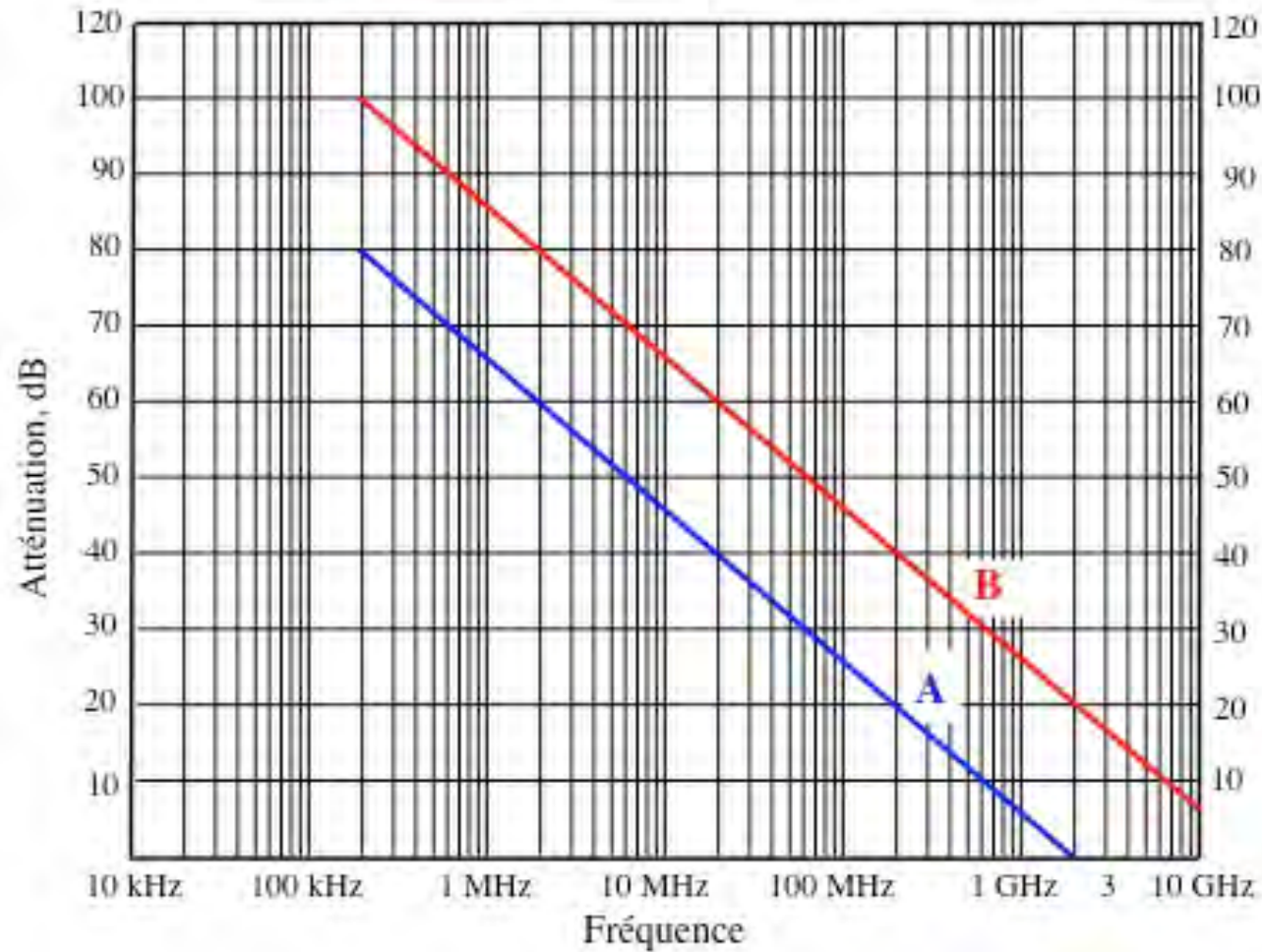


Fig. 2 Atténuation calculée d'une couche de grillage acier, soudé aux intersections

(A) grillage 50 mm

(B) grillage 5 mm.

Combinaison béton fibré + grillage

En associant au mieux :

- un béton fibré, absorbant en HF, et
- un treillis efficace en BF mais perdant cet avantage quand F augmente,

On peut construire des locaux dont les parois atténueront les champs électromagnétiques dans une très large plage de fréquences.

La combinaison (Fig.3) d'un treillis de maille 5 mm avec un béton fibré de 0,50 m garantit $\geq 60\text{dB}$ de 1MHz jusqu'à $> 10\text{GHz}$.

Atténuation totale béton + grillage

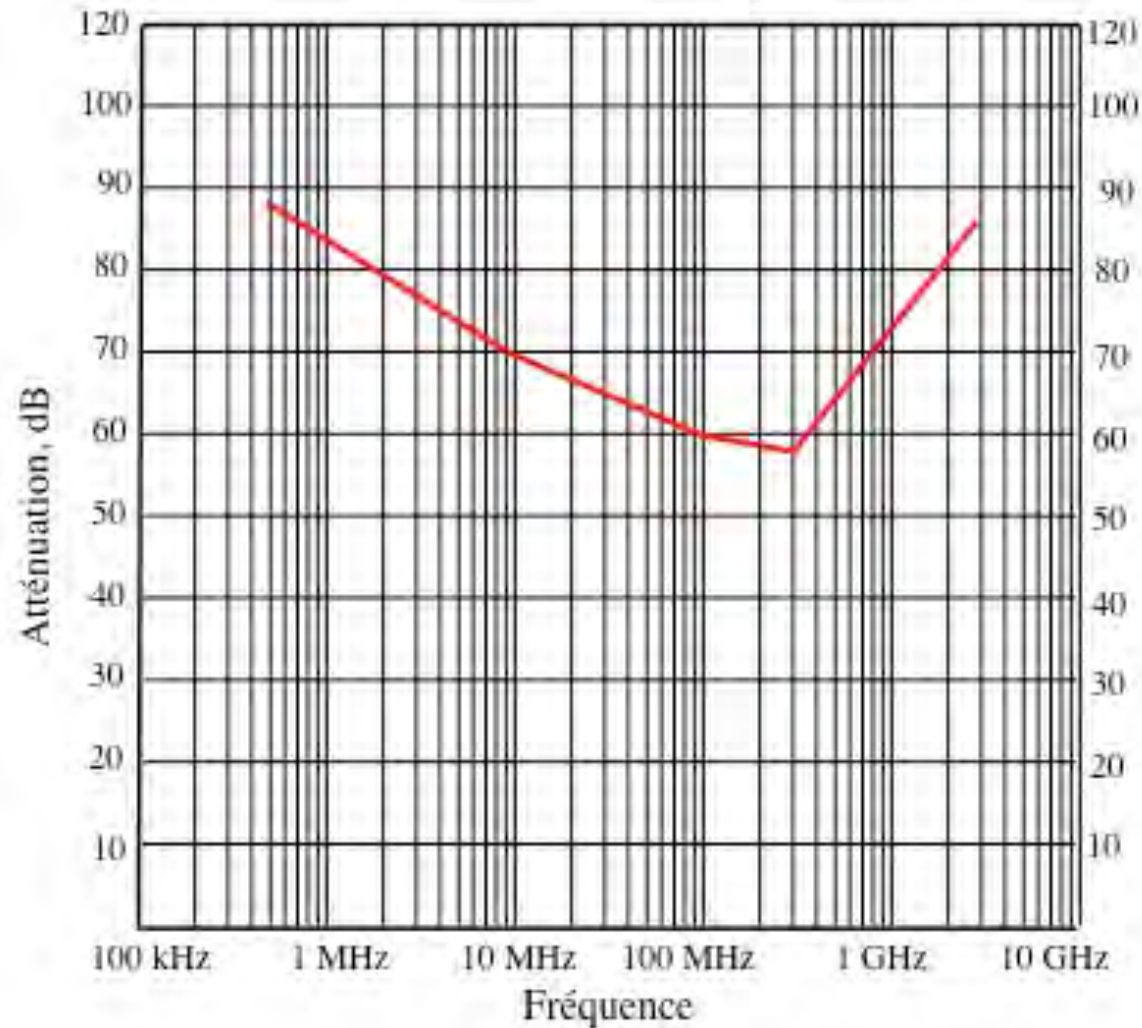


Fig. 3 Association couche de grillage acier, 5 mm + mur béton fibré de 0,50 m. Performance calculée en l'absence de toute autre ouverture dans l'enceinte. Dans la partie gauche, c'est le treillis qui fournit essentiellement l'atténuation, le béton chargé prenant le relais à partir de 150MHz.

Antériorités

Quelques applications utilisant un grillage noyé dans du béton ont été brevetées.

Il y manque l'ensemble de facteurs-clé que procure le procédé présenté ici.

L'optimisation se joue sur plusieurs aspects :

- **Le treillis ne doit pas être noyé dans le béton mais posé en surface.**
- Le béton a été intentionnellement rendu conducteur par mixage de fibres métalliques,
- Un béton fibré de résistivité $30 \Omega \cdot m$ commence à participer au blindage vers 50 - 100MHz ; il a alors atteint une impédance caractéristique $Z_c \approx 100 \Omega$.

- **Si le treillis est noyé:**

Le champ E qui le frappe n'est plus E dans l'air ($Z_c = 377 \Omega$) mais un champ en milieu légèrement conducteur.

La désadaptation est moins favorable entre champ incident et impédance treillis.

La perte par réflexion champ \rightarrow treillis n'est plus proportionnelle à Z_c (air) / Z_{treillis} , mais à Z_c (béton) / $Z(\text{treillis})$.

Cette transition moins abrupte fait perdre un facteur 4 à l'atténuation espérée du treillis.

Principal avantage du béton intelligent

Avec le béton Intelligent, le premier interface air-treillis est plus fortement désadapté, la perte par réflexion est maximum.

Avantage particulièrement crucial si les sources de champ rayonné que l'on veut atténuer sont proches (par exemple moins de quelques mètres) de la paroi.

C'est exactement le cas si le blindage du local doit assurer l'anticommission (contre l'espionnage électromagnétique).

L'atténuation d'un treillis en champ magnétique proche n'est alors plus aussi bonne que vis-à-vis de sources lointaines. Il est donc primordial dans ces applications de maintenir la meilleure performance possible du treillis.

Autres avantages du béton intelligent

a) Avec un treillis noyé dans le béton :

La coulée d'un mur en plusieurs fois, ou l'assemblage de plusieurs panneaux préfabriqués posent le délicat problème de la reprise bord-à-bord des éléments de grillage sur les 4 côtés, sans discontinuité électrique.

Toute discontinuité (par ex. de simples agrafages de place en place) ruine l'efficacité du treillis en créant une fente longue, donc une fuite.

Au contraire la pose du treillis en surface avec contact continu métal-métal se fait facilement par des lés à recouvrement, comme un papier mural.

b) En jouant sur 3 paramètres aisément maîtrisés: **épaisseur du béton, % de fibres, dimension de la maille du treillis**, on obtient un « béton intelligent », dont les caractéristiques peuvent être ajustées à l'avance pour des performances données.

c) Grande facilité pour adapter les éléments en traversée :

- gaines de ventilation
- traversées de câbles et conduits de fluide
- chambranles de portes et vitres blindées, etc.

d) Rend facile l'inspection de l'intégrité du treillis après installation.

Le diable se cache dans les détails...

Comme souvent avec une idée innovante, les ennuis se cachent dans les détails, ici dans les éléments du second-œuvre.

Une batterie de dispositifs spécifiques a été développée pour faciliter la réalisation et l'installation des :

- Traversées de grilles et conduits de ventilation.
- Pénétrations des câbles et canalisations.
- Chambranles des portes et fenêtres.
- Accessoires intérieurs : éclairage, détection incendie, contrôles d'accès...
- Joints de dilatation / expansion aux angles, etc.

Sans attention particulière, chacun peut devenir la source d'une fuite qui ruine l'efficacité attendue.

Joint de dilatation

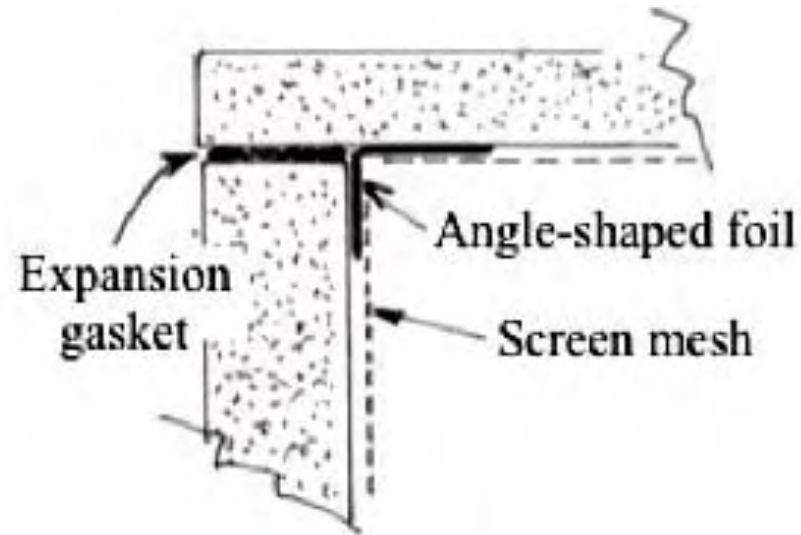


Fig. 4 Maintien de la continuité électrique aux joints de dilatation

- a) Dans de grands bâtiments, des joints de dilatation de place en place permettent un mouvement relatif aux angles. Ces joints, non conducteurs, créent une longue fente qui détériore l'efficacité de blindage.

Solution : **Feuillard acier agrafé** sous le bord des treillis (Fig. 4) à chaque angle de la pièce pour shunter l'interstice. Un petit excédent de longueur autorise le glissement.

Gaines de ventilation

b) Des ouvertures fonctionnelles doivent traverser le béton.

Cage de Faraday ordinaire : grilles en nid d'abeille et plaques de traversée pourvues d'un large rebord en contact avec les bords de l'orifice.

Treillis en surface : le rebord peut faire contact avec le treillis, mais un champ arrivant avec inclinaison échappera au béton conducteur, ne laissant que l'atténuation du treillis, insuffisante vers $F > \text{MHz}$.

Solution : **Fourreau ajusté** pour prolonger le rebord des grilles ou brides de conduits dans toute la traversée du béton.

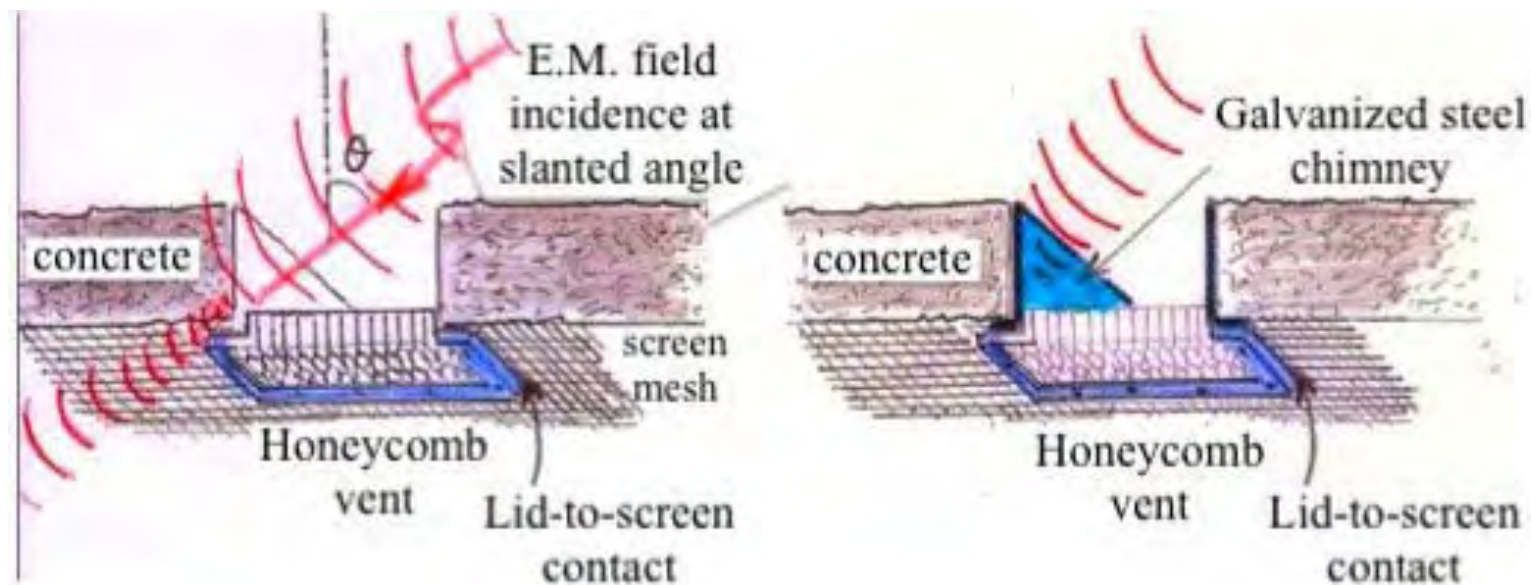


Fig. 5 Gauche : champ en incidence inclinée échappant au béton. Droite : solution

Accessoires intérieurs

c) Des nombreux accessoires doivent être accrochés aux murs.

Attention :

Ce blindage global intégré aux murs n'a pas l'apparence austère, dépouillée des cages de Faraday usuelles, pourvues de portes à verrouillage en force, avec voyants, alarmes, etc... où opère un personnel averti.

Au contraire, un local en béton conducteur, une fois appliqués les enduits, peintures ou panneaux muraux peut avoir l'apparence d'un environnement de travail ordinaire. L'utilisateur équipera de meubles, moquette ou revêtements de sol usuels. Les occupants y exerceront leurs activités normales.

Donc, sans avertissements / précautions, des sous-traitants non informés fixeraient des luminaires, chemins de câbles, étagères, porte-manteaux, huisseries, partitions, etc... tout ce qui est normalement installé en bureaux, ateliers, corridors.

Tout banal percement dans un mur béton + treillis = **une fuite**.

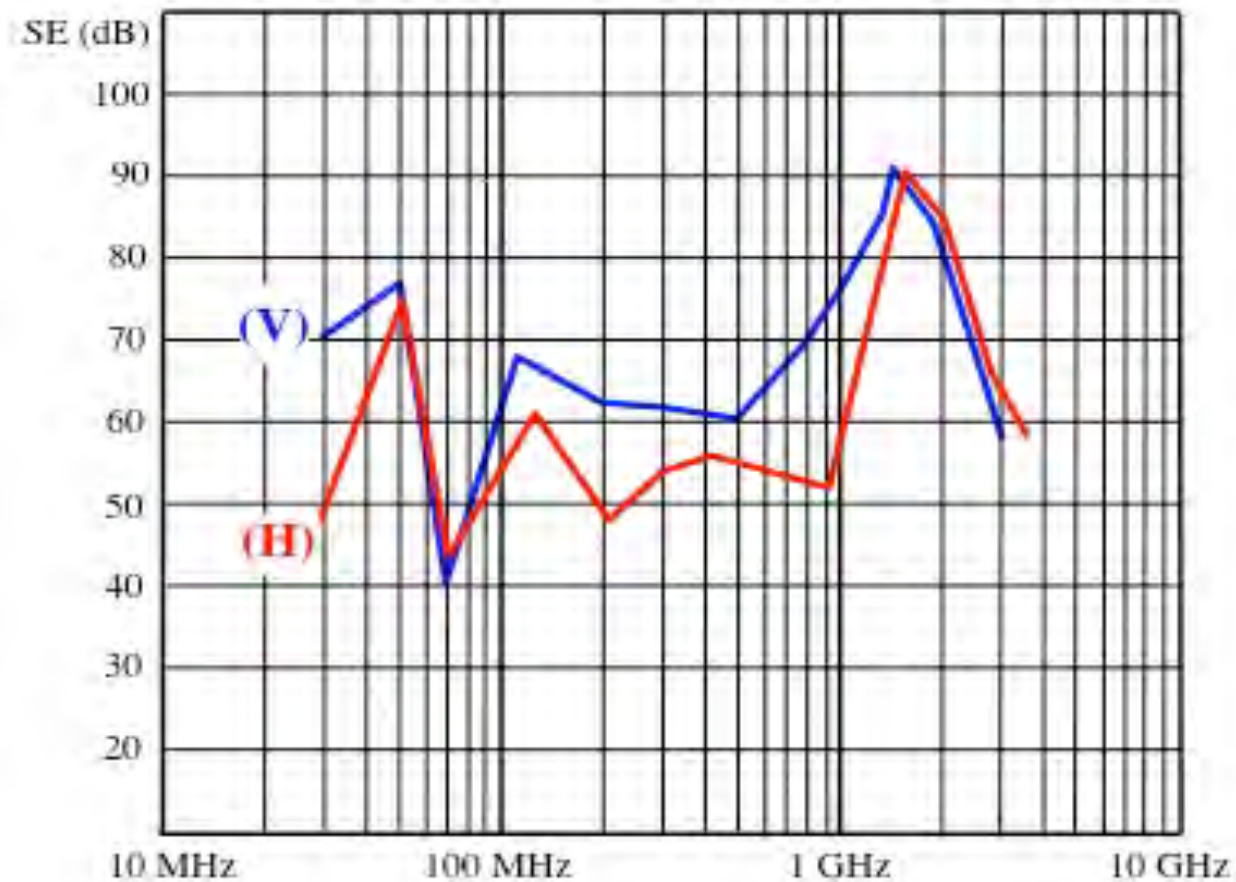
Solution : **Chevilles spéciales**, métalliques avec large collerette forcées dans le béton, faisant un contact périphérique fiable avec le treillis.

Résultats de mesures sur bâtiment terminé

Les techniques décrites ont été appliquées pour la construction d'un site de 4000 m².

La performance globale apparaît légèrement < enceinte idéale en béton fibré + treillis sans ouvertures. En fait la mesure était faite avant inspection détaillée des traversées.

Guidée par ces résultats, une inspection finale a révélé quelques fuites au montage des joints de portes d'entrée, qui furent corrigées.



« Béton Intelligent »
(Intelligent Concrete)
est une marque
déposée, brevetée
par SPIE / Batigolles
et EuroMC.

Fig. 6 Atténuation de blindage en polar V et H