

CAHIER DES MODULES DE CONFÉRENCE POUR LES ÉCOLES D'ARCHITECTURE

CONFÉRENCES : BÉTON, ARCHITECTURE, PERFORMANCES ET APPLICATIONS



À gauche : immeuble de logements, Lyon Confluence, Emmanuelle Colboc architecte, photo de H. Abbadie.
À droite : salle de musique, Nancy, Périphériques Architectes, photo de L. Boegly

PERFORMANCES THERMIQUES ET ACOUSTIQUES DES BÂTIMENTS EN BÉTON

PERFORMANCES THERMIQUES ET ACOUSTIQUES DES BÂTIMENTS EN BÉTON

Sommaire

1. Béton et confort thermique	5
1.1 - Contexte et principes de base	5
1.2 - La réglementation thermique 2012 (RT 2012)	5
1.2.1 - La RT 2012 s'appuie sur trois piliers:	6
1.2.2 - Exigences de performances globales	6
1.2.3 - Des exigences de moyens	7
1.3 - Une architecture à faibles besoins climatiques	8
1.3.1 - Comment agir au niveau du bâti?	8
1.4 - Quelques exemples d'architectures à faibles besoins climatiques	13
1.4.1 - Lycée du Pic-Saint-Loup	13
1.4.2 - Siège social de l'Ademe	16
1.4.3 - Immeuble de bureaux BBC	19
1.4.4 - Immeuble de logements, Lyon Confluence	22
<hr/>	
2. Béton et confort acoustique	24
2.1 - Le son, qu'est-ce que c'est?	24
2.2 - Le bruit, qu'est-ce que c'est?	25
2.2.1 - Des bruits normalisés	26
2.2.2 - Maîtriser l'acoustique dans le bâtiment	26
2.3 - La réglementation acoustique	27
2.3.1 - Les textes réglementaires	27
2.3.2 - Mesures acoustiques à l'achèvement des travaux	27
2.3.3 - Isolement acoustique standardisé pondéré au bruit aérien vis-à-vis des bruits de l'espace extérieur	27
2.3.4 - Bruit de choc standardisé	28
2.3.5 - Les valeurs réglementaires pour le bâtiment	28

2.4 - Affaiblissement acoustique et isolement	28
2.4.1 - Pour les bruits aériens	28
2.4.2 - Pour les bruits de choc	29
2.4.3 - Isolation acoustique et absorption acoustique, deux actions différentes	29
2.4.4 - Ne pas confondre indice d'affaiblissement et isolement	29
2.5 - Transmission acoustique à travers une paroi simple	30
2.6 - Transmission acoustique à travers une paroi double	31
2.7 - Transmission acoustique à travers un vitrage	33
2.8 - Maîtriser la qualité acoustique d'un bâtiment	34
2.8.1 - Les façades	34
2.8.2 - Les cloisons	35
2.8.3 - Les doublages extérieurs	35
2.8.4 - Les revêtements de sol	35
2.8.5 - Les isolants thermiques	35
2.8.6 - Les dispositions constructives	36
2.9 - Quelques exemples d'architectures maîtrisant la qualité acoustique du bâti	37
2.9.1 - Immeuble de bureaux	37
2.9.2 - Salle de musique	39

Conclusion	41
-------------------	-----------

Glossaire	42
------------------	-----------

La construction neuve en France fait l'objet de toutes les attentions de nos politiques. De très nombreuses réglementations et incitations ont été mises en œuvre afin d'augmenter le nombre de logements construits dans le pays, et ainsi de résorber un déficit chronique entre l'offre et la demande (l'objectif est de 500 000 logements construits annuellement).

Dans ce contexte, les maîtres d'œuvre doivent concilier un ensemble d'objectifs qui apparaissent parfois contradictoires. Il faut en effet construire en nombre des bâtiments correspondant à des critères de qualité de plus en plus exigeants, tout en limitant au maximum leur impact environnemental et de plus, pour les logements, à des coûts (celui du foncier plus celui du bâti) compatibles avec les revenus de nos concitoyens.

Parmi ces critères de qualité, outre la résistance structurelle des constructions, le maître d'œuvre recherche avant tout le « confort du futur utilisateur » dans son logement. Pour obtenir ce sentiment de « bien vivre », deux points spécifiques doivent être abordés de concert :

- le confort thermique ;
- le confort acoustique.

• Le confort thermique

Le confort thermique – ou plutôt hygrothermique – est une notion difficile à cerner. Il est **subjectif** : d'une personne à l'autre, d'une situation à l'autre, d'une heure ou d'une saison à l'autre, la sensation

de bien-être ou l'absence de gêne est très variable. Les tentatives d'objectivation du confort hygrothermique se sont appuyées sur des approches statistiques. Il en ressort des critères physiques supposés satisfaire une majorité d'individus.



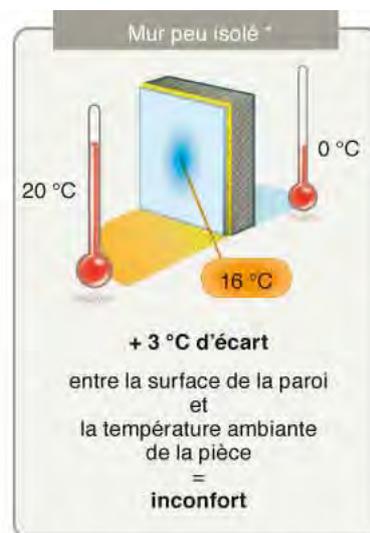
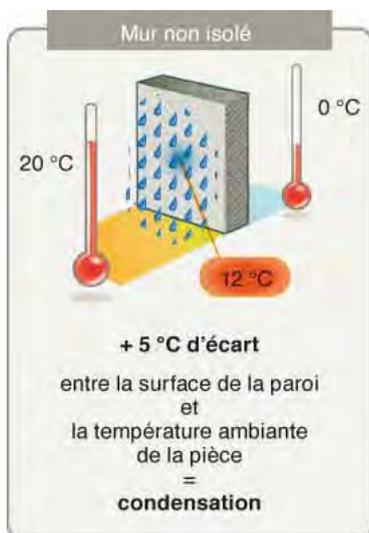
Ces critères sont principalement la température de l'air et des parois, les variations spatiales de ces températures, l'hygrométrie de l'air, la vitesse de l'air.

Mais comment mesurer ce confort hygrothermique ? La moyenne entre la température de l'air et celle des surfaces des parois est appelée « température opérative », considérée comme la température intérieure ressentie :

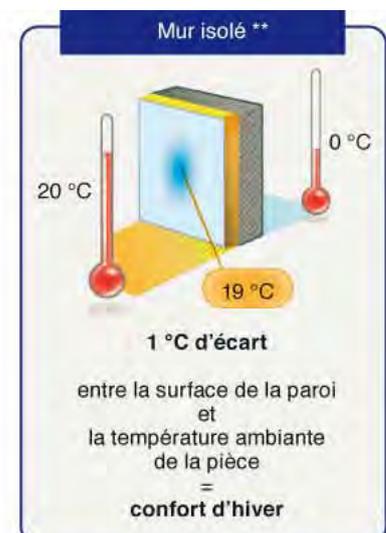
$$t_o = \frac{t_{mr} + t_a}{2}$$

t_a = température de l'air

t_{mr} = température des surfaces des parois



* Mur doublé avec isolant 20 mm



** Mur doublé avec isolant 100 mm

Effet sur le confort de différences de température entre air de la pièce et parois

Les fourchettes de valeur de ces critères définissant des « zones » de confort dépendent, entre autres, de l'activité du sujet et de son niveau d'habillement.

La demande de confort, à ne pas confondre avec la sensation du confort, évolue en fonction des époques. Les exigences exprimées par les usagers tendent vers l'obtention d'une ambiance intérieure constante toute l'année. Le développement de la climatisation en est un exemple frappant, bien qu'il soit par ailleurs contradictoire avec les objectifs de limitation des émissions de gaz à effet de serre (GES)¹.

• Le confort acoustique

Une ambiance sonore est dite de qualité si :

- elle n'est pas dangereuse pour l'oreille. Au-delà d'une certaine quantité de bruit (intensité x durée), les cellules ciliées de l'organe auditif sont détruites irrémédiablement, ce qui conduit à la surdité ;



- elle permet de percevoir facilement les sons ou bruits utiles et désirés ;
- elle permet de ne pas être dérangé par des sons ou bruits inutiles et non désirés.

À l'intérieur d'une pièce, on obtient cette ambiance sonore de qualité lorsque :

- la réverbération est maîtrisée, de sorte que les sons utiles et désirés (habituellement produits dans la pièce) puissent se propager correctement, avec suffisamment d'intensité et sans déformation pour être facilement perçus ;
- les occupants sont protégés des bruits (habituellement inutiles et dérangeants) en provenance de l'espace extérieur au bâtiment (route, trains, avions, usine, jeux...), des autres pièces du bâtiment (bruits d'origine aérienne ou solidienne) ou des équipements (chauffage, ventilation, ascenseur, robinets...).

Ces critères de qualité exigeants sont compatibles avec des objectifs globaux.

Il faut à la fois respecter une **consommation minimale d'énergie** (RT 2012), répondre à des valeurs **d'amortissement acoustique** imposées (réglementation acoustique) tout en respectant les **niveaux de coût** attendus de la construction et en limitant au maximum les impacts sur l'environnement.

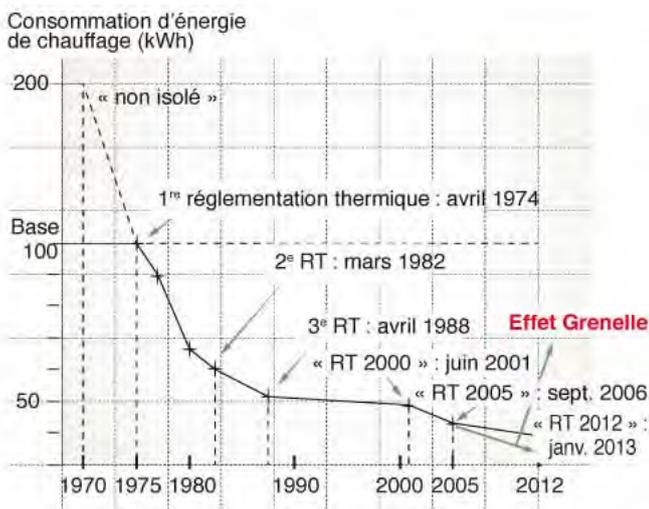
¹ Consommations électriques supplémentaires, forts appels de puissance en été (nécessité de compenser le « repos » du parc nucléaire en remettant en marche des centrales à combustible fossile), dissémination de fluides frigorigènes dont le confinement n'est pas parfait et dont les rejets dans l'atmosphère ont un impact beaucoup plus important sur l'effet de serre que les consommations énergétiques supplémentaires engendrées par la climatisation.

1. Béton et confort thermique

1.1 - Contexte et principes de base

C'est un fait : le bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie avec 43 % de l'énergie consommée en France, et il est un contributeur majeur aux émissions de gaz à effet de serre (24 %). C'est donc un secteur sur lequel il faut agir.

C'est naturellement le chauffage des logements qui est visé avant tout.



Consommation de chauffage de 1970 à 2012
Effet des différentes réglementations

La première réglementation thermique de 1974 a permis de diviser par deux les consommations de chauffage (calculs effectués à confort identique). Aujourd'hui, un logement qui respecte la RT 2012 permet de diviser par 10 la consommation de chauffage par rapport à un logement non isolé.

Cette nouvelle réglementation thermique est issue de la loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement. Les objectifs de la réglementation thermique des bâtiments neufs sont inscrits dans son article 4 : « [...] réduire les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre des bâtiments, susciter une évolution technologique et industrielle significative [...] tout en préservant un bouquet énergétique équilibré, faiblement émetteur de GES et contribuant à l'indépendance énergétique nationale. »

1.2 - La réglementation thermique 2012 (RT 2012)

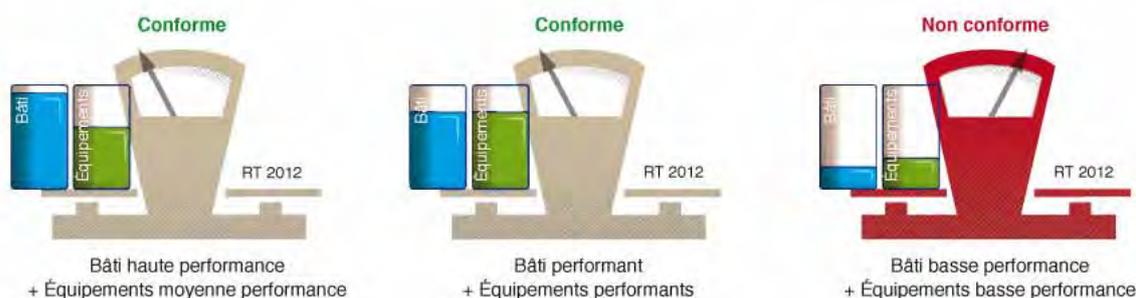
Cette réglementation est applicable aux permis de construire dont la demande aura été déposée à partir :

- du 1^{er} janvier 2013 **en résidentiel**, avec une consommation maximale de 50 kWhep/m² pour les maisons individuelles et 57,5 kWhep/m² pour les logements collectifs (mais à partir du 1^{er} janvier 2015, la consommation maximale sera de 50 kWhep/m² pour tous les logements)² ;
- du 1^{er} janvier 2011 **en non-résidentiel**, pour les **bâtiments publics** et pour les logements construits dans le cadre de **programmes ANRU**.

Cette nouvelle réglementation impose donc la généralisation d'un niveau BBC (bâtiment basse consommation) pour tous les bâtiments et prépare une nouvelle étape (2020 : les bâtiments à énergie positive, BEPOS).



² L'unité utilisée est le kWh_{ep}/m² : kilowattheure équivalent pétrole par mètre carré.



Dans ce contexte, le parc de bâtiments existant pose un problème considérable, car il doit être rénové massivement si l'on veut atteindre les objectifs fixés par le Grenelle de l'environnement.

1.2.1 - La RT 2012 s'appuie sur trois piliers :

- la conception du bâti, qui doit être très performante ;
- la valorisation des apports des énergies renouvelables ;
- le choix de systèmes énergétiques performants.

Comme pour la RT 2005, cette nouvelle réglementation laisse de **grandes libertés de choix**. Cependant, il n'est plus question de bâtiment de référence mais simplement de seuil à ne pas dépasser.

La RT 2012 affiche des exigences de performances mais aussi des exigences de moyens.

1.2.2 - Exigences de performances globales

- Exigence d'efficacité énergétique minimale du bâti, **Bbio_{max}** : exigence de limitation simultanée du besoin en énergie pour les composantes liées au bâti (chauffage, refroidissement et éclairage).
- Exigence de consommation maximale, **C_{max}** : exigence de consommation maximale d'énergie (objectif de valeur moyenne de 50 kWh_{ep}/m²), en valeur absolue uniquement.
- Exigence de confort d'été, **Tic** : température intérieure conventionnelle. **Tic < Tic_{réf}**. La Tic est

un indicateur provenant de la précédente réglementation thermique RT 2005. Elle indique, pour une région donnée, la température intérieure correspondant au niveau de confort d'été garanti sans utilisation d'une climatisation consommatrice d'énergie.

D'autres exigences sont à venir.

1.2.2.1 - L'efficacité énergétique du bâti (Bbio)

L'exigence d'efficacité énergétique minimale du bâti est définie par le coefficient « Bbio_{max} » (besoins bioclimatiques du bâti : chauffage, refroidissement et éclairage), qui impose une optimisation des performances indépendamment des systèmes énergétiques mis en œuvre. Désormais, les solutions synthétisant les échanges entre les architectes et les ingénieurs seront donc valorisées dès les premiers stades de la conception.

Le Bbio tient compte des caractéristiques suivantes du bâtiment :

- déperditions surfaciques et linéiques des parois opaques ;
- déperditions par les baies ;
- inertie ;
- apports solaires ;
- impact des protections solaires et de leur mode de gestion ;
- scénarios d'occupation et apports internes dus aux occupants ;
- autres apports internes, à l'exception des pertes récupérables des équipements de chauffage, de rafraîchissement, d'eau chaude sanitaire ;
- apports par des dispositifs passifs non séparables du bâti (serres, vérandas, parois pariéto-dynamiques) ;
- infiltrations d'air par les défauts de perméabilité de l'enveloppe ;

- déperditions par renouvellement d'air calculées sur une base conventionnelle représentant la moyenne constatée dans les bâtiments BBC;
- accès à l'éclairage naturel des locaux.

Le Bbio ne tient pas compte des éléments suivants :

- pertes et rendement des systèmes de chauffage, d'ECS et de refroidissement;
- consommation du système réel d'éclairage;
- déperditions liées au système réel de ventilation;
- consommation des auxiliaires des systèmes de chauffage, de refroidissement, d'ECS, de ventilation.

On calcule trois composantes : **Bbioch** (chauffage), **Bbiofr** (froid), **Bbioecl** (éclairage).

Le Bbio est calculé de la façon suivante :

$$Bbio = 2 \times (Bbioch + Bbiofr) + 5 \times Bbioecl$$

en nombre de « points », sans dimension.

L'exigence d'efficacité énergétique minimale du bâti s'appelle le $Bbio_{max}$, pour tous les types de bâtiments. On doit obtenir $Bbio/Bbio_{max} \leq 1$, avec des pondérations tenant compte de la zone climatique considérée, de l'altitude et de la surface du logement considéré.

$$Bbio_{max} = Bbio_{max\ moyen} \times (M_{Bgéo} + M_{Balt} + M_{Bsurf})$$

1.2.2.2 - La consommation énergétique du bâtiment (Cep_{max})

L'exigence de consommation conventionnelle maximale d'énergie primaire se traduit par le coefficient « Cep_{max} » qui porte sur les consommations de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, de production d'eau chaude sanitaire et les consommations auxiliaires (pompes et ventilateurs).

La valeur moyenne du Cep_{max} s'élève à 50 kWh/m² d'énergie primaire, modulée selon la localisation géographique, l'altitude, le type d'usage du bâtiment, la surface moyenne des logements, et les émissions de gaz à effet de serre pour le bois énergie et les réseaux de chaleur les moins émetteurs de CO₂.

Cette exigence impose, en plus de l'optimisation du bâti exprimée par le Bbio, le recours à des équipements énergétiques performants à haut rendement.

Cep: consommation d'énergie primaire des équipements choisis pour répondre aux besoins Bbio du bâtiment.

C_{max} : exigence de consommation maximale.

Consommation maximale : $Cep \leq C_{max}$,

avec :

- cinq usages pris en compte : chauffage, ECS (eau chaude sanitaire), refroidissement, éclairage et auxiliaires (pompes et ventilateurs);

- $C_{max} = 50 \times$ coefficients de modulation (localisation géographique, altitude, surface moyenne des logements du bâtiment, catégorie CE1/CE2, modulation en fonction des émissions de GES).³

$$C_{epmax} = 50 \times M_{Ctype} \times (M_{Cgéo} + M_{Calt} + M_{Csurf} + M_{Cges})$$

1.2.2.3 - Le confort d'été dans les bâtiments non climatisés

À l'instar de la RT 2005, la RT 2012 définit des catégories de bâtiments dans lesquels l'exigence est de parvenir à assurer un bon niveau de confort en été sans recourir à un système actif de refroidissement. Pour ces bâtiments, la réglementation impose que la température la plus chaude atteinte dans les locaux au cours d'une séquence de cinq jours très chauds d'été, n'excède pas un certain seuil. C'est la **température intérieure conventionnelle** (Tic).

Le calcul de cette Tic reste très simplifié et les premiers retours d'expérience du BBC montrent qu'elle est généralement sous-estimée. Un travail de mise à jour de cette donnée est actuellement lancé et viendra amender l'actuelle réglementation. Mais on peut d'ores et déjà souligner que les solutions béton ont un atout important : l'inertie thermique. Bien utilisée, cette inertie permet de gagner jusqu'à 3 °C.

1.2.3 - Des exigences de moyens

1.2.3.1 - Exigence pour garantir le confort de l'habitation

Des dispositions constructives particulières doivent obligatoirement être mises en œuvre afin de garantir un confort optimal.

- **Surface minimale de baies** (surface de baies supérieure à 1/6 surface habitable).

- Obligation de traiter de la **perméabilité à l'air** des logements, respect d'une perméabilité à l'air

³ MC type : coefficient de modulation selon le type de bâtiment ou partie de bâtiment et sa catégorie CE1/CE2.

maximale. La perméabilité à l'air de l'enveloppe sous 4 Pa, Q4Pa-surf⁴, est inférieure ou égale à :

- maisons individuelles: 0,60 m³/(h.m²) *parois déperditives* ;
- logements collectifs: 1 m³/(h.m²) *parois déperditives*.

- Obligation de **traiter les ponts thermiques**

1.2.3.2 - Pour accélérer le développement des énergies renouvelables

Un des objectifs majeurs de cette nouvelle réglementation est de promouvoir l'utilisation **d'énergies renouvelables** se substituant à des consommations **d'énergies fossiles**. À cet effet, un certain nombre d'obligations sont créées suivant les types de bâtiments et les équipements mis en œuvre :

- produire l'eau chaude sanitaire à partir d'un système de production d'eau chaude sanitaire **solaire thermique** ;
- être raccordé à un réseau de chaleur alimenté à plus de 50 % par une **énergie renouvelable et de récupération** ;
- démontrer que la consommation d'énergie Cep d'un bâtiment comprend *a minima* 5 kWh/m² d'énergie primaire produite à partir d'au moins une **source d'énergie renouvelable** ;
- recourir à une production d'eau chaude sanitaire assurée par un appareil électrique individuel de **production d'eau chaude sanitaire thermodynamique** ;
- recourir à une production de chauffage et/ou d'eau chaude sanitaire assurée par une **chaudière à micro-cogénération** à combustible liquide ou gazeux ;
- recourir à une production d'eau chaude sanitaire assurée par un appareil électrique individuel de production d'eau chaude sanitaire **thermodynamique**.

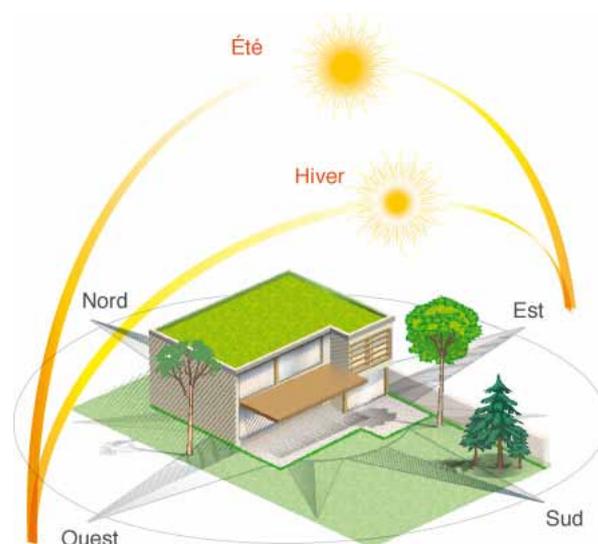
1.3 - Une architecture à faibles besoins climatiques

1.3.1 - Comment agir au niveau du bâti ?

Tout d'abord, un état d'esprit: **ne pas chercher à s'opposer au climat mais composer avec lui**. Pour cela, quelques règles simples seront appliquées à la conception du projet. Elles prendront successivement en considération – entre autres – son orientation, sa géométrie (surfaces et linéaires des parois), les caractéristiques de l'isolation des parois et du traitement des ponts thermiques, son inertie, les apports solaires (surfaces et caractéristiques des vitrages), et sa perméabilité à l'air.

1.3.1.1 - L'orientation

L'implantation et l'assise du bâtiment vont d'abord dépendre des contraintes ou des opportunités du site: quelles sont les vues les plus agréables? Les orientations les plus profitables aux apports solaires? D'où viennent les vents dominants? Y a-t-il des pollutions sonores, olfactives?



En termes d'énergie, les points essentiels pour l'orientation seront la possibilité d'intégrer des capteurs solaires (en toiture, en auvent...), de favoriser un ensoleillement optimal des façades en hiver, de limiter les vitrages à l'ouest qui sont les plus

4 Q4Pa : débit de fuite d'air.

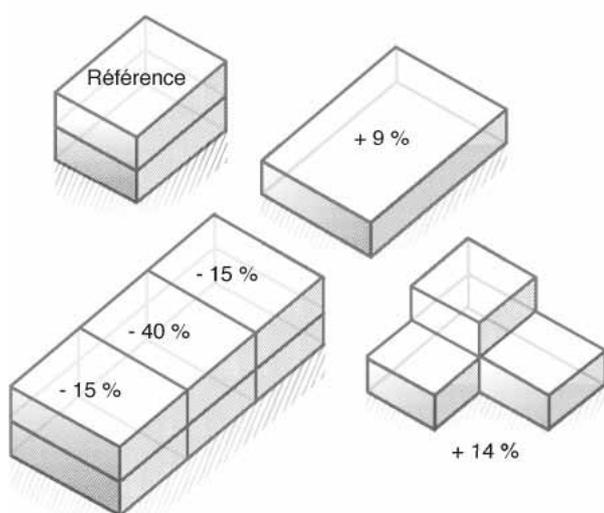
problématiques vis-à-vis du confort d'été, de limiter les effets du vent d'hiver et de permettre une ouverture des fenêtres en été pour profiter de la fraîcheur du soir et de la nuit.

1.3.1.2 - La géométrie

La **compacité** consiste à minimiser la surface des **parois déperditives** à volume chauffé constant, réduisant ainsi les déperditions thermiques par transmission et par renouvellement de l'air. La compacité des bâtiments est donc un concept très prisé quand on cherche à rendre des bâtiments moins énergivores.

Un bâtiment compact est un bâtiment qui a un rapport faible entre la surface des parois extérieures et la surface habitable. Sans brider la conception architecturale, il est plus économique et bénéfique pour l'efficacité thermique de retenir des formes plutôt compactes. Cette recherche de la compacité est moins importante en zone méditerranéenne, du fait des faibles consommations de chauffage.

Un bâtiment « découpé » nécessitera un effort particulier pour bien isoler l'ensemble des décrochements et découpes, car ils représenteront une part non négligeable dans les déperditions et les points faibles pour l'étanchéité à l'air. Le traitement de certains ponts thermiques pourra s'avérer difficile ou impossible.



Exemple de déperditions comparées de l'enveloppe de différents logements de 96 m²

Les déperditions influencent uniquement les consommations de chauffage qui ne représentent qu'un poste des consommations.

Par ailleurs, passer de la maison individuelle à un habitat « en bande », ou à du petit collectif, permet de diminuer les surfaces déperditives et donc d'améliorer la compacité et de diminuer les coûts d'investissement.

1.3.1.3 - Les surfaces vitrées

En hiver, durant la saison de chauffe, des fenêtres orientées vers le sud permettent de gagner plus d'énergie solaire qu'elles ne perdent de chaleur.

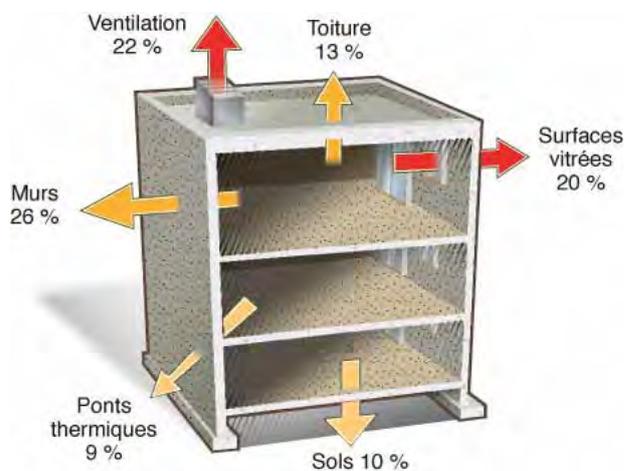
Le rapport optimum surface vitrée/surface habitable est compris entre 16 et 18 %. **Dans la RT 2012, il est demandé que ce rapport soit supérieur à 16 %.**

1.3.1.4 - La résistance thermique des parois opaques

Dans le nouveau contexte de la RT 2012, la **résistance thermique** (R) des parois opaques devient un facteur très important (Bbios).

Quelques points clés devront être étudiés spécifiquement pour atteindre les résistances thermiques nécessaires (R compris entre 4 et 6 m².K/W aujourd'hui, contre 2,5 à 3 dans la réglementation précédente) :

- la liaison du bâti avec le sol ;
- les caractéristiques thermiques du système constructif mur (système porteur en béton avec remplissage en bloc béton, par exemple, associé à un isolant) ;
- mais aussi le traitement des **ponts thermiques** ;
- l'étanchéité à l'air de l'ensemble (source de « fuites thermiques » dans un immeuble mal isolé).



Immeuble sans isolation
Parois béton 20 cm, surfaces vitrées = 15 % SH

Il faut, d'une manière générale, **augmenter la résistance thermique des parois** en combinant correctement ses matériaux constitutifs.

La capacité d'un matériau à résister au froid et au chaud est appelée « résistance thermique » ou R . Elle exprime la capacité d'un matériau à résister au froid et au chaud. Plus R est élevé, plus le produit est isolant.

Exprimé en $m^2.K/W$ (Kelvin par Watt), l'indice R s'obtient par le rapport de l'épaisseur en mètres linéaires sur la conductivité thermique du matériau λ (lambda)⁵. Le béton plein est crédité d'une conductivité de 1,75 W alors qu'une laine de verre est créditée d'une conductivité de 0,04 W.

Conductibilité thermique des différents matériaux	
Matériau	Lambda / m°C
Polyuréthane	0,025 W
Polystyrène extrudé	0,03 W
Laine de verre	0,034 à 0,056 W
Laine de lin	0,035 à 0,038 W
Ouate de cellulose	0,035 à 0,040 W
Laine de roche	0,038 à 0,047 W
Laine de chanvre	0,04 W
Polystyrène expansé	0,04 W
Perlite exfoliée	0,05 W
Laine de coco	0,05 W
Liège expansé	0,05 W
Panneaux de fibre de bois	0,05 W
Vermiculite exfoliée	0,05 à 0,07 W
Chanvre en vrac	0,05 à 0,07 W
Brique de chanvre	0,12 W
Brique Monomur	0,11 à 0,18 W
Bois	0,12 à 0,23 W
Béton cellulaire	0,16 à 0,24 W
Blocs de terre comprimée	1,05 W
Brique de terre crue	1,1 W
Brique de terre cuite	1,15 W
Béton plein	1,75 W
Pierre lourde	2,1 à 3,5 W
Acier	52 W

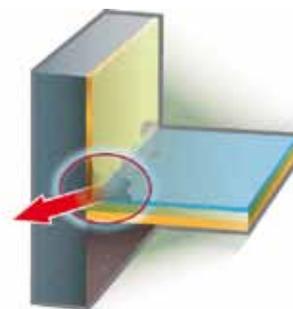
⁵ Le pouvoir isolant d'un matériau s'évalue à partir de ce qu'on appelle sa conductivité thermique, notée lambda: c'est sa capacité propre à conduire la chaleur. Plus la conductivité est faible, autrement dit plus lambda est petit, plus le pouvoir isolant du matériau est grand. Le coefficient de conductivité thermique s'exprime en $W/m.K$ (Watt par mètre par Kelvin, un Kelvin étant égal à une variation d'un degré Celsius).

Il apparaît clairement que les performances thermiques du seul matériau porteur ne sont pas suffisantes pour atteindre la résistance demandée pour les parois (comme nous l'avons vu précédemment, dans le cas de la RT 2012, R se situe entre 4 et 6 $m^2.K/W$). Il faut donc prendre en compte les caractéristiques du système constructif global, « **éléments porteurs + isolants** ».

Trois systèmes principaux sont utilisés :

- **isolation thermique par l'intérieur** (ITI), où l'isolation est posée à l'intérieur du local habité ;
- **isolation thermique par l'extérieur** (ITE), où l'isolation est posée à l'extérieur du local habité ;
- **double mur**, où l'isolation est insérée entre un mur porteur et un mur d'habillage (les monomurs tendront à disparaître en tant que tels).

En plus de ce travail sur les caractéristiques thermiques des systèmes constructifs mis en œuvre, il faut aussi traiter soigneusement les ponts thermiques pour atteindre l'exigence d'efficacité énergétique du bâti $B_{bio,max}$.



On trouve les ponts thermiques à l'intersection des parois, lorsque l'isolation est discontinue, ou au droit de l'ossature (métallique, bois, etc.). Les ponts thermiques vont se traduire par une déperdition de chaleur très importante vers l'extérieur, qui va créer des points froids à l'intérieur du bâtiment, conduisant parfois à des problèmes de condensation ou de moisissures. Il n'existe aucun moyen de remédier à ces problèmes lorsqu'ils sont présents.

Un pont thermique est caractérisé par un coefficient de transmission linéique, ψ ($W/ml.K$). Plus ce coefficient est important, plus le pont thermique est problématique.

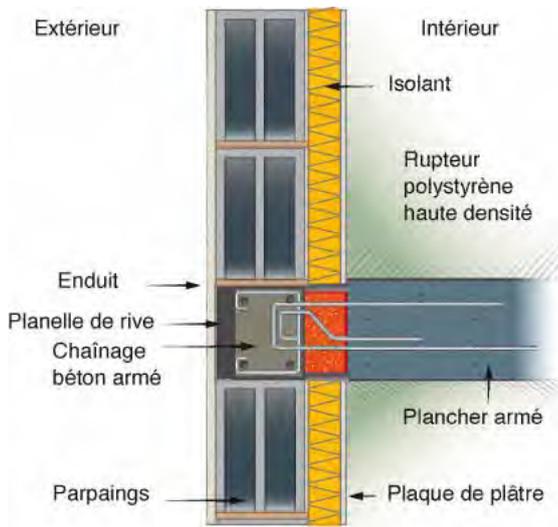
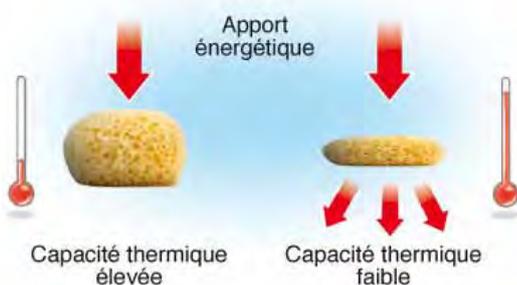


Schéma de principe d'un rupteur de pont thermique disposé au niveau d'une liaison plancher-mur extérieur

Les ponts thermiques se traitent au moyen de rupteurs. Ils sont de plusieurs types et seront situés à l'interface entre une paroi froide (façade généralement) et une paroi chaude (refend ou plancher entre locaux chauffés). Le principe consiste alors à insérer un isolant thermique sur tout ou partie de la section de la dalle (ou du refend) au niveau de sa jonction avec la façade. Cette technique est principalement utilisée dans des bâtiments isolés par l'intérieur, mais il en existe aussi pour des systèmes d'isolation thermique par l'extérieur, au niveau des balcons par exemple. Ces rupteurs sont des compromis entre isolation thermique, tenue au feu, performance mécanique et isolation acoustique.

1.3.1.5 - L'inertie du bâtiment

L'inertie thermique est un concept très simple, bien connu des anciens, dont la traduction physique est complexe. C'est la capacité d'un bâtiment à stocker la chaleur ou la fraîcheur et à restituer cette chaleur ou cette fraîcheur aux moments opportuns. Plus l'inertie d'un bâtiment est forte, plus il se réchauffe et se refroidit lentement. L'exemple le plus simple est celui de l'éponge qui accumule de l'eau et qui la restitue lorsqu'on la presse.

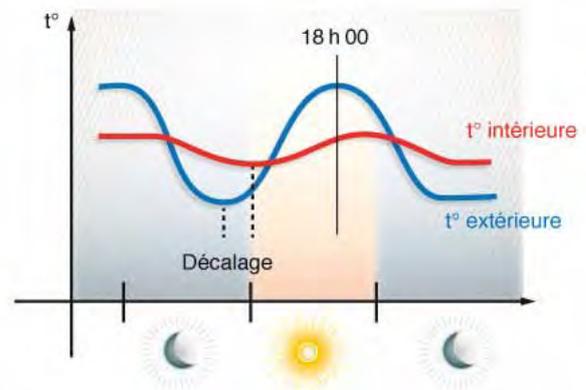


Cependant, comme un mur, cette éponge a une capacité de stockage maximale et une fois gorgée d'eau, elle ne pourra plus retenir le liquide. L'essentiel tient donc dans la capacité qu'a le matériau constitutif du mur à stocker de l'énergie thermique (**la capacité thermique**). Le béton a une excellente capacité thermique.

Capacité thermique de quelques matériaux usuels	
Matériau	Capacité thermique en $\text{KJ/m}^3\text{K}$
Bois de structure	960
Béton	2 400 – 2 610
Maçonnerie en briques	630 – 1 800
Pierre	2 520 – 2 790

Mais il n'y a pas de bonne inertie thermique sans capacité à échanger l'énergie emmagasinée avec le milieu extérieur. Cette capacité d'échange dépend de deux notions :

- la **diffusion** de la chaleur à l'intérieur du matériau (diffusivité) – moyenne pour le béton mais compensée par des épaisseurs importantes ;
- l'aptitude à **échanger** en surface (effusivité) – très bonne pour le béton.



L'influence de l'inertie thermique est primordiale : c'est elle qui permet d'amortir l'amplitude de l'onde thermique et de décaler cette onde.

La résultante de ces deux phénomènes permet de réguler « naturellement » la température à l'intérieur d'un bâtiment.

1.3.1.6 - L'étanchéité à l'air

Un bâtiment dont l'**étanchéité à l'air** est mauvaise peut voir ses besoins de chauffage augmenter de plusieurs $\text{kWh/m}^2\cdot\text{an}$ par rapport à une réalisation de qualité. Cet impact est particulièrement important si le climat est froid ou venté.

De plus, lorsqu'on utilise un système de ventilation double flux, le rendement de celui-ci peut se trouver fortement réduit, l'air passant par les trous et non pas par l'échangeur. L'enjeu est plus important encore dans le cas des bâtiments peu compacts, où la qualité de l'étanchéité à l'air est encore plus décisive.

Les défauts d'étanchéité se traduisent par des infiltrations d'air parasite et ont un impact en termes de déperditions, de confort, de santé, d'acoustique et d'efficacité des systèmes de ventilation. Ils se situent principalement au niveau des jonctions : menuiseries extérieures, passages de câbles et appareillages électriques, trappes et éléments traversant les parois, liaisons façade-plancher, liaisons façade-toiture et coffrages de volets roulants. Dans les systèmes constructifs à ossature, les parties courantes de l'enveloppe peuvent également comprendre de nombreuses fuites si la pose n'est pas conforme aux DTU.

Pour obtenir une bonne étanchéité à l'air, il est nécessaire d'intégrer cette préoccupation dès la phase de conception, et d'abord en limitant le nombre d'ouvertures dans l'enveloppe et en décrivant précisément les détails d'exécution. Le concepteur pourra s'appuyer sur de nombreux produits et systèmes spécialement conçus pour assurer une excellente maîtrise de l'étanchéité (membranes, **pare-vapeur, frein-vapeur**, joints pré-comprimés, passe-câbles et passe-conduits, adhésifs à longue durée de vie, etc.).

Dans le cas de l'utilisation de volets roulants, une attention particulière devra être accordée aux garanties fournies par les fabricants.

La qualité de la mise en œuvre est également essentielle. Il est primordial de sensibiliser les entreprises et de leur fournir des détails d'exécution clairs. Tout au long du chantier, le maître d'œuvre doit assurer un suivi rigoureux du traitement des points sensibles. Éventuellement, il sera judicieux de finaliser les détails constructifs des points sensibles avec les entreprises concernées.

Pour être conforme à la RT 2012, on doit impérativement se fixer un objectif de perméabilité inférieur ou égal à $0,6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ en maison individuelle et à

$1,0 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ en collectif, et vérifier avant la réception que ces objectifs sont atteints. S'il s'avère que ces limites sont dépassées, il sera nécessaire de mettre en œuvre des mesures correctives.

Il est généralement judicieux de réaliser un test intermédiaire, avant la fermeture des parements et autres gaines techniques, pour identifier les fuites et apporter les éventuelles corrections sans destruction.



Comme le montre ce schéma, les sources de fuites d'air sont nombreuses et nécessitent, pour être combattues, le respect scrupuleux des différentes règles professionnelles.



1.4 - Quelques exemples d'architectures à faibles besoins climatiques

1.4.1 - Lycée du Pic-Saint-Loup

Saint-Clément-de-Rivière (34980)

Architecte : Pierre Tourre

Livraison : 2005

UN TRAVAIL SUR L'INERTIE DU BÂTIMENT

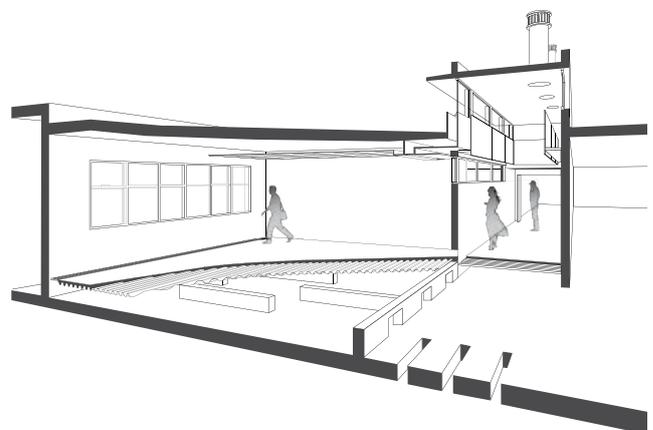
Pour répondre à l'objectif de confort thermique d'été, la bonne orientation et la protection solaire sont des conditions indispensables, mais non suffisantes. Il faut aussi jouer sur d'autres paramètres qui sont, d'une part, l'inertie thermique du bâtiment (ou des corps de bâtiment) et, d'autre part, la ventilation naturelle.

Pour simplifier, on peut dire que l'inertie thermique est la capacité d'un bâtiment à absorber puis à restituer les calories ou les frigories de manière diffuse. Plus l'inertie est importante (plus les matériaux utilisés lors de la construction sont lourds), plus le bâtiment stocke d'énergie.

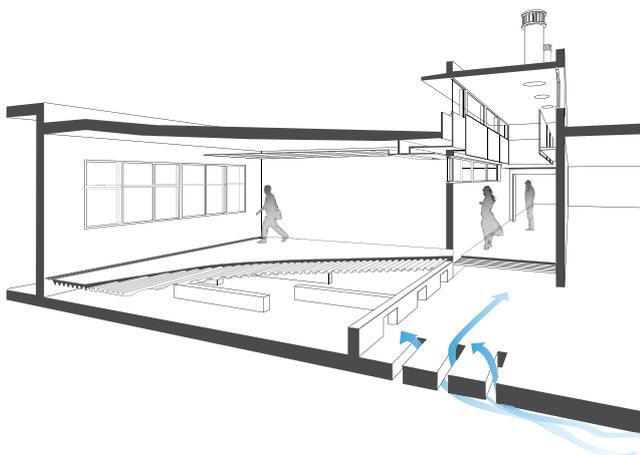
Le béton est un matériau à forte inertie thermique. Il peut capter la chaleur ou la fraîcheur

ambiante, la stocker et la restituer plus tard dans l'habitation, favorisant ainsi les économies d'énergie pour le chauffage ou la ventilation.

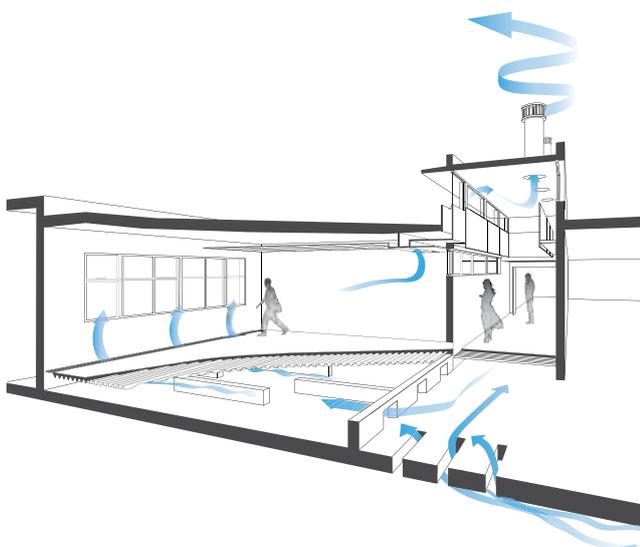
Dans le cas du lycée du Pic-Saint-Loup, réalisé par l'architecte Pierre Tourre en 2005, à Saint-Clément-de-Rivière (Hérault), l'inertie thermique du bâtiment est obtenue en utilisant du béton coulé en place (refends porteurs, murs de façade et murs des couloirs de circulation). Tous ces murs peuvent accumuler de la fraîcheur pendant la nuit et la restituer le jour.



À cela, s'ajoute un système de ventilation naturelle conçu spécifiquement pour ce projet, afin de favoriser le principe d'inertie thermique mis en œuvre.



Le système de ventilation naturelle est basé sur un double plancher. L'air est capté sous le plancher dans une zone à l'ombre, donc plus fraîche. Il circule dans le double plancher, où il se rafraîchit au



contact du béton. Il est ensuite aspiré en haut de la salle de classe et passe par un plénum dans le couloir de circulation.

Il est enfin aspiré et évacué par des tourelles particulières de type Edmonds. Ces tourelles australiennes, fonctionnant par dépression thermique ou par le vent, ont un diamètre de 40 cm et donnent un débit d'air suffisant pour permettre une extraction continue de l'air. Les tourelles équipées d'un



registre motorisé asservi à la vitesse du vent et à la température assurent la mise en dépression des circulations et permettent un balayage des classes. Toute l'année, quelle que soit la saison, les salles de classe profitent ainsi d'une température constante. Le système de ventilation est par ailleurs très hygiénique car il n'utilise aucun conduit, ce qui évite les problèmes d'aéroulque.

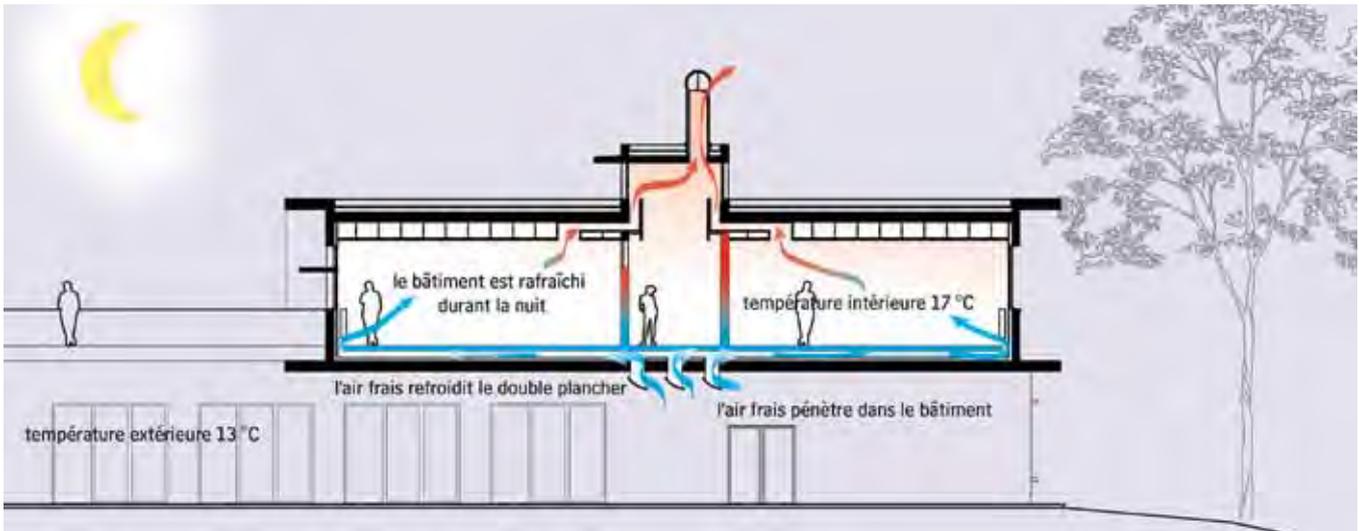
Les prises d'air installées en sous-face du plancher sont toujours à l'ombre.



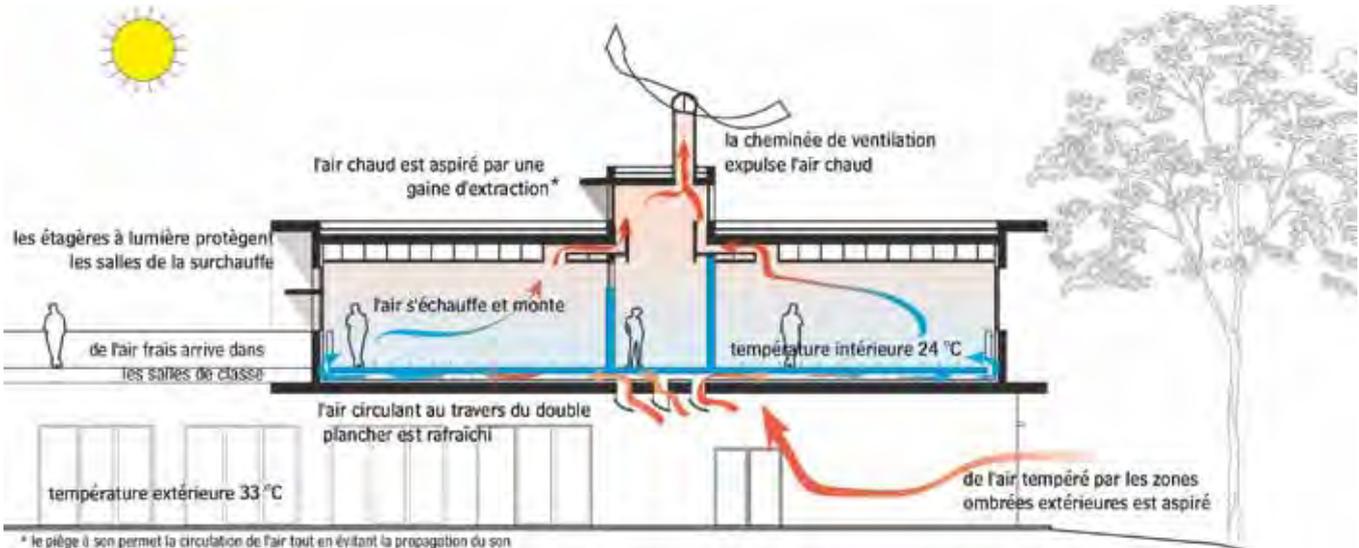
Toujours en sous-face des planchers, trois ailettes en tôle d'aluminium laqué constituent des déflecteurs qui orientent l'air vers les prises d'air pour alimenter le cycle de ventilation naturelle.

PRINCIPE DE VENTILATION NATURELLE

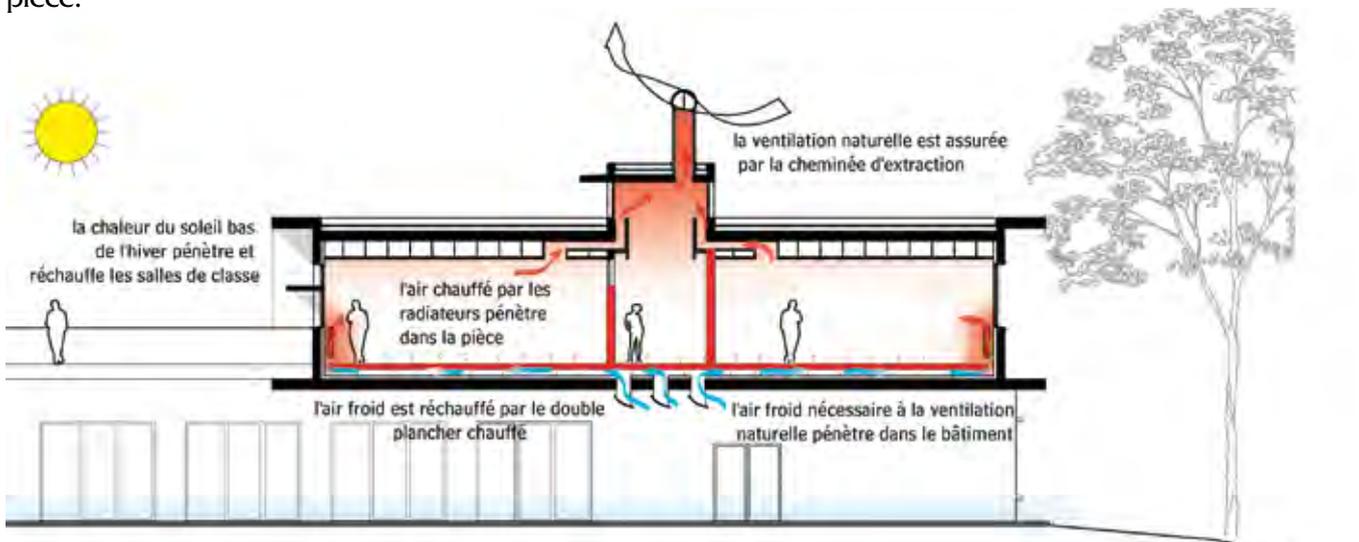
En été, la température plus basse la nuit permet de refroidir le bâtiment.



Pendant la journée, l'air est rafraîchi dans le plancher par l'inertie du béton. Il pénètre dans la classe où il s'échauffe, puis il est rejeté en partie haute et extrait par les tourelles Edmonds.



Pendant les journées d'hiver, l'air froid est tempéré lors de son passage dans le double plancher. Pénétrant dans la salle de classe au niveau des radiateurs, il est réchauffé par ces derniers avant de circuler dans la pièce.





1.4.2 - Siège social de l'Ademe

Angers (49000)

Conception-réalisation : Frédéric Rolland, architecte et GTB Construction - AREA - EVEN

Livraison : 2009

LE PROJET ARCHITECTURAL

À côté d'une réhabilitation très classique des bâtiments existants, le maître d'œuvre a voulu la construction d'une extension beaucoup plus performante, à la hauteur de l'image d'un prescripteur de mesures environnementales de la dimension de l'Ademe⁶.

C'est en 2007 que les opérations ont été lancées, le maître d'ouvrage choisissant le cadre spécifique de la conception-réalisation. Les lauréats du concours ont été l'architecte Frédéric Rolland, d'Angers, et l'entreprise GTB, du groupe Bouygues.

⁶ L'Ademe, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, a un statut d'établissement public. Depuis 1993, elle prend en charge, de façon indépendante, des missions que l'administration lui délègue.

Ses missions, autour de l'énergie et de l'environnement, consistent à :

- encourager la recherche par des actions diverses – participation, financement, etc. ;
- informer (professionnels et grand public) ;
- conseiller (par des études ou en fournissant des outils adaptés) ;
- aider à réaliser (financements) ;
- prescrire : l'Ademe est aussi le conseiller privilégié de l'État pour les prescriptions techniques, réglementaires voire législatives liées à l'énergie, aux déchets, à l'environnement.

Le projet consiste en l'implantation de deux nouveaux bâtiments reliés aux anciens par des passerelles, l'un dans le prolongement du bâtiment nord, l'autre perpendiculairement à la pente, en direction de l'est.



Les deux ailes nouvelles de l'ensemble épousent le terrain mais elles profitent aussi de la déclivité, surtout le bâtiment sud. C'est un élément qui intervient également dans les performances thermiques de l'ensemble. La coupe inférieure montre très bien la passerelle qui va du niveau 0 de l'accueil au niveau 3 du bâtiment est. Le décaissé toute hauteur est de 12 m.

LES CIBLES HQE® RETENUES

Huit des quatorze cibles HQE ont été retenues par le maître d'ouvrage, dont bien évidemment celles



qui relèvent de la mission de l'Ademe quant à l'énergie et l'environnement :

- Cible 1 - Relation harmonieuse du bâtiment avec son environnement immédiat
- Cible 3 - Chantier à faibles nuisances
- Cible 4 - Gestion de l'énergie
- Cible 5 - Gestion de l'eau
- Cible 6 - Gestion des déchets d'activité
- Cible 7 - Gestion de l'entretien et de la maintenance
- Cible 8 - Confort hygrométrique
- Cible 9 - Confort acoustique

DANS CE CONTEXTE, POURQUOI UN BÂTIMENT EN BÉTON ?

Pour les concepteurs, le béton s'impose comme :

- la solution économico-technique optimale ;
- le matériau le plus adapté pour obtenir une forte inertie ;
- une structure capable de porter les gros planchers, d'où une coque de béton complète avec ses grands voiles toute hauteur ;
- le moyen d'une rationalisation de la façade ;
- le moyen d'une architecture libre, car on atteint les performances thermiques grâce au complexe caché ;
- la possibilité d'une grande liberté de choix pour le revêtement final, qui devait s'harmoniser avec les falaises de schiste de la région.

Pour l'entreprise, le béton était :

- le moyen de répondre aux performances exigées ;
- le matériau le mieux adapté aux contraintes de réalisation de chantier.



LA SOBRIÉTÉ ÉNERGÉTIQUE : UN OBJECTIF CONSTANT

Le choix des solutions techniques a toujours été guidé par la sobriété énergétique :

- indice de compacité (somme des surfaces déperditives/volume) très performant : 0,48 [surfaces déperditives (murs + parois vitrées + toiture) 2 742 m²/volume 5 700 m³] ;
- indice de solarisation : 70 % des vitrages exposés entre sud-est et sud-ouest ;

- apports internes : occupation humaine, informatique, éclairage de sécurité, détection incendie, détection de présence, etc. ; Ils fournissent 36 % des besoins de chauffage et les apports solaires environ 40 % ;
- chauffage : raccordement sur le réseau de chaleur existant (chaudière gaz à condensation) avec émission par radiateurs eau chaude disposés en allège des fenêtres ;
- production d'énergies renouvelables : elle n'a pas été prise en compte pour montrer l'efficacité de la sobriété énergétique dans la maîtrise du coût de fabrication du bâtiment et de la consommation d'énergie.

LES PERFORMANCES DES PAROIS

La structure béton mise en œuvre est très simple : des voiles de façade porteurs coulés en place reprennent une partie des charges, les planchers béton s'appuyant sur ces voiles et sur des poutres centrales supportées par des rangées de poteaux.



Les planchers béton ainsi réalisés permettent de dégager un maximum d'espace utile.

Les performances de l'enveloppe sont obtenues par une isolation par l'extérieur de forte épaisseur, par le traitement des ponts thermiques et par le



choix de menuiseries et de vitrages à hautes performances acoustiques et thermiques (menuiseries à rupteur de pont thermique).

Qui plus est, la présence d'une structure en béton confère une grande inertie au bâtiment.

Désignation	Revêtement extérieur	Isolant	Voile/Dalle	R (m²°C/W)
Murs extérieurs avec isolation extérieure	bardage métallique	laine de verre ép. 16 cm	béton ép. 18 cm	3,90
Toiture-terrace isolée	bitume d'étanchéité	PSE ép. 22 cm	béton ép. 18 cm	5,55
Plancher bas donnant sur l'extérieur	bardage métallique	laine de verre ép. 16 cm	béton ép. 18 cm	3,90
Plancher bas intérieur donnant sur local non chauffé		laine de verre ép. 12 cm	béton ép. 20 cm	3,00
Plancher bas sur terre-plein		PSE ép. 8 cm	béton ép. 24 cm	2,10

LE BILAN ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT

- Les déperditions de l'enveloppe du bâtiment Ubât (0,544 W/m²K) sont inférieures de 29,26 % aux déperditions de référence Ubât_{réf} (0,770 W/m²K).
- La consommation conventionnelle globale d'énergie du bâtiment Cep (30,18 kWhép/m² SHON) pour les postes chauffage, éclairage, auxiliaires (ventilateurs, pompes...) est inférieure de 57,62 % à la consommation conventionnelle de référence Cep_{réf} du bâtiment (71,22 kWhép/m² SHON).

COÛT ET DÉLAIS DE CONSTRUCTION DU BÂTIMENT

La surface hors œuvre nette (SHON) construite est de 3089 m² et le coût des travaux constaté est de 1 540 euros HT/m² SHON.

La part des travaux de performance énergétique s'établit à 6,9 % du coût total. Il n'y a eu par ailleurs aucun dépassement de coût à la livraison du bâtiment.

Durée du chantier : 11 mois (travaux terminés avec 1 mois d'avance sur le planning).



1.4.3 - Immeuble de bureaux BBC

Épinal (88000)

Maîtrise d'œuvre : Lucien Colin architecte mandataire, Jean-Baptiste Buret chef de projet, Dominique Henriet architecte
Livraison : 2010

LE PROJET ARCHITECTURAL

Ce bâtiment administratif (un ensemble de soixante-dix postes de travail plus des salles de réunion) répond aux critères du label BBC.

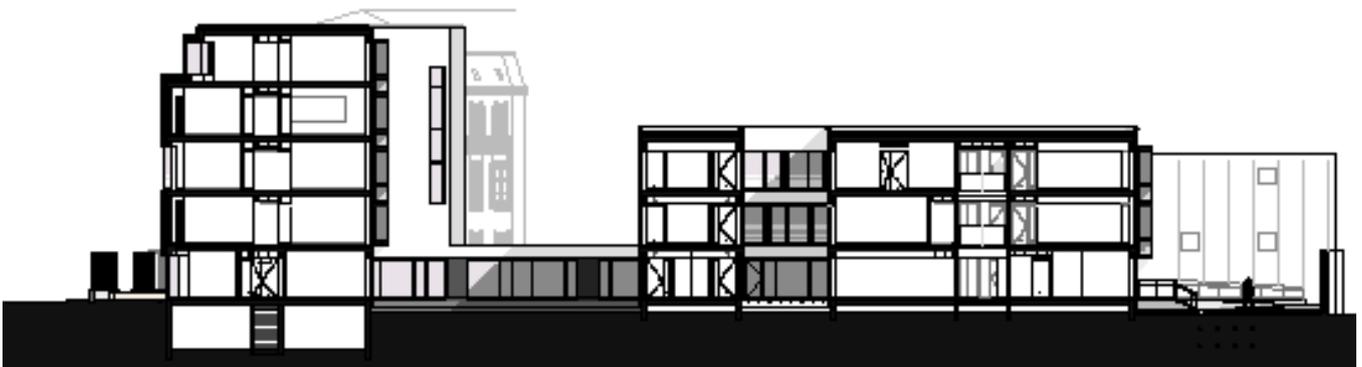
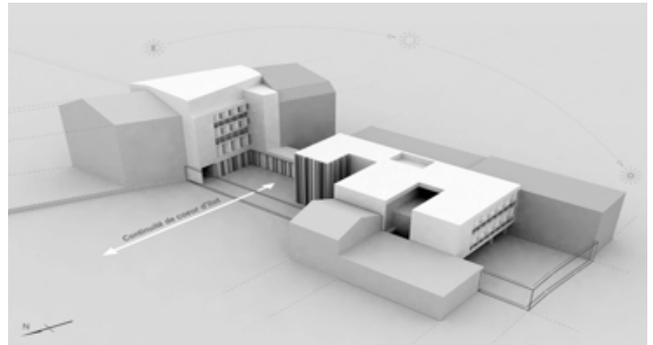
Sur rue, un premier corps de bâtiment reprend l'alignement et la volumétrie des constructions existantes. À l'intérieur de la parcelle, un second corps de bâtiment se développe dans le gabarit des mitoyens et dans la continuité du cœur de l'ensemble de l'îlot. Ces deux entités sont reliées entre elles par une galerie intérieure à simple rez-de-chaussée généreusement ouverte sur un jardin central.

LE BILAN ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT

Ce nouvel immeuble de bureaux répond aux normes les plus strictes en termes de dépenses énergétiques. Sa consommation totale se situe en dessous de 65 kWh/m²/an, dont seulement 15 kWh/m²/an pour le chauffage. Le chauffage des locaux en hiver et leur rafraîchissement en été sont assurés par un plancher chauffant-rafraîchissant qui utilise l'inertie thermique du béton. Il n'y a pas de climatisation.

L'enveloppe du bâtiment fait l'objet d'une étanchéité à l'air renforcée. Toutes les dispositions constructives (liaisons équipées de rupteurs, etc.) sont prises pour supprimer les ponts thermiques, et 30 cm d'isolant pour les murs, voire plus dans certaines parties, permettent d'obtenir une excellente isolation thermique.

Toutes les parois vitrées et les fenêtres du bâtiment sont fixes et ne peuvent donc être ouvertes. L'architecte Lucien Colin a cependant prévu des panneaux de ventilation qui offrent à chaque occupant d'avoir la possibilité d'ouvrir sur l'extérieur. Toutefois, les occupants doivent se sensibiliser au fait que l'ouverture intempestive de ces ventilations peut nuire aux performances BBC de l'édifice.



Vue en coupe longitudinale sur le projet. On distingue le vide sanitaire sous le bâtiment en cœur de parcelle.

STRUCTURE BÉTON

Tous les éléments de structure du projet – poteaux, poutres, voiles et dalles de plancher – sont en béton coulé en place. La rigidité de la structure béton, associée à des dispositions constructives pertinentes (noyaux indéformables, fractionnement par joints parasismiques en blocs de forme rectangulaire et compacte, etc.), permettent de répondre aux exigences de la réglementation parasismique en vigueur. La portée des dalles est importante (environ 7,50 m). Ce choix permet d'obtenir des plateaux d'étage plus libres, qui offrent une grande modularité et présentent un fort potentiel d'évolutivité des espaces intérieurs dans le temps.

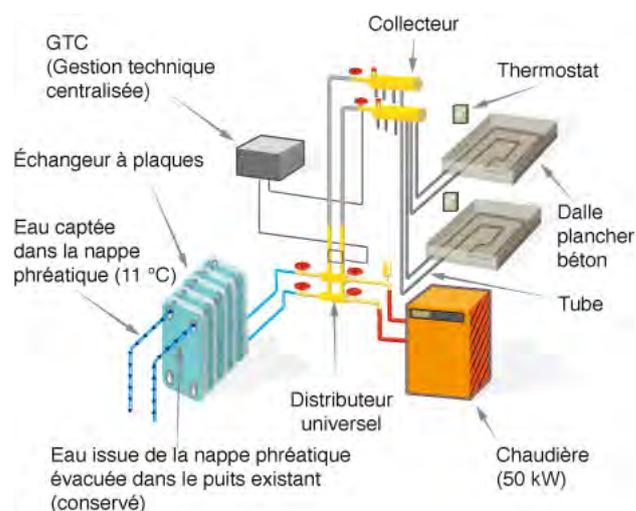


Dimensionnées pour supporter une charge de 1 t/m², les dalles de plancher ont une épaisseur de 30 cm. Le système de plancher chauffant-rafraîchissant met à profit l'inertie thermique des dalles en béton armé et joue un rôle primordial dans les performances énergétiques de ce bâtiment BBC.

PLANCHER CHAUFFANT-RAFRAÎCHISSANT

Chaque plancher est parcouru par un réseau de tuyaux intégré au cœur de la dalle en béton armé et dans lequel circule de l'eau. Pendant la période froide, cette eau est chauffée par un générateur gaz mural à condensation de 50 kW. Pendant la saison chaude, l'eau est refroidie au travers d'un échangeur à plaques parcouru par de l'eau froide captée dans la nappe phréatique présente sur le site à faible profondeur. L'eau utilisée n'est pas réinjectée directement dans la nappe phréatique pour éviter tout risque de pollution de cette nappe. Elle est

évacuée dans un ancien puits existant sur le site et conservé à cet effet. Il n'y a pas de compresseur ou de groupe de froid comme dans une climatisation classique, poste de consommation habituellement majeur dans les immeubles de bureaux.



Dans le cas de ce système de plancher chauffant-rafraîchissant, le réseau de tuyaux est intégré au cœur de la dalle en béton armé (système très répandu en Allemagne et souhaité par l'architecte). Deux tiers de la chaleur ou de la fraîcheur sont diffusés vers le haut et un tiers vers le bas. Du fait de la très forte inertie du système structurel et des dalles en béton, la température est assez uniforme dans l'ensemble du bâtiment.

L'excellente isolation du bâtiment (rupteurs de ponts thermiques, isolation par l'intérieur ou par l'extérieur selon les cas, etc.) aboutit à une déperdition minimale en termes de chauffage. L'hiver, ceci permet d'assurer le chauffage entier de l'établissement par l'intermédiaire d'une chaudière murale de 50 kW seulement.

A contrario, la ville d'Épinal étant située dans une zone de climat continental, il peut y avoir, en été, des épisodes de forte chaleur où la température extérieure atteint, voire dépasse les 30 °C. En été, donc, le rafraîchissement des locaux se fait en utilisant l'eau de la nappe phréatique. La température de l'eau de cette nappe varie peu entre l'hiver et l'été. Elle est en moyenne de l'ordre de 11 °C.

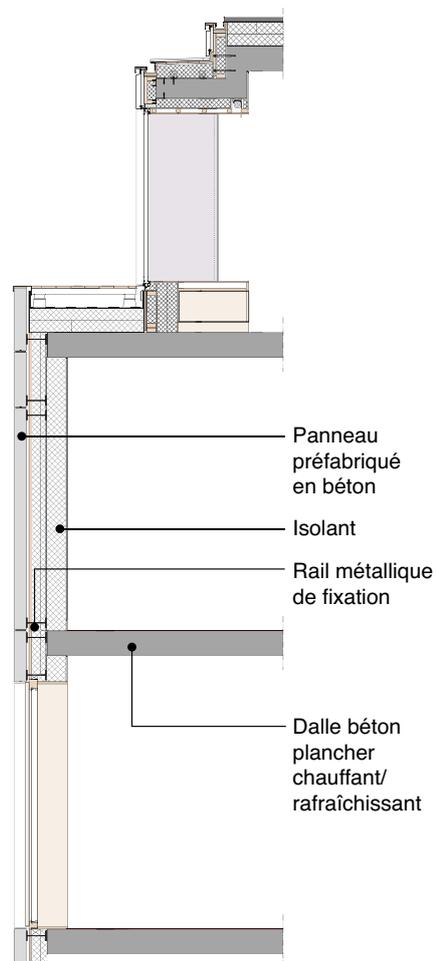
L'eau y est puisée et conduite jusqu'à un échangeur à plaques. (L'eau de la nappe ne peut pas être envoyée directement dans le réseau du plancher chauffant/rafraîchissant, car elle contient des impuretés qui risqueraient d'encrasser ce réseau.) La fraîcheur de l'eau de la nappe est récupérée au niveau de l'échangeur à plaques et transmise au fluide parcourant le réseau du plancher chauffant-rafraîchissant. L'échangeur n'a pour but que de séparer les deux réseaux de fluides. Le rafraîchissement des locaux se fait ainsi presque gratuitement par les planchers chauffants-rafraîchissants. La seule énergie consommée est celle utilisée pour faire fonctionner le système (par pompe). La fraîcheur contenue dans l'eau de la nappe phréatique est quant à elle totalement gratuite.

La mise en œuvre de ce système est une première dans la région vosgienne. Le recul dont on dispose après une année d'utilisation, avec un été chaud, montre que le système de rafraîchissement fonctionne très bien. Cette performance est tout à fait conforme aux prévisions.

DES FAÇADES PERFORMANTES

La façade sur rue affirme la présence institutionnelle de l'édifice. Elle décline une composition régulière, sobre et élégante de panneaux préfabriqués en béton brut de décoffrage de couleur beige clair alternant surface lisse et surface rainurée. Les panneaux horizontaux et lisses, posés au niveau des dalles de plancher, soulignent la stratification des niveaux. Les menuiseries en mélèze des fenêtres ainsi que l'habillage en zinc pré-patiné du dernier étage en retrait et des parois en fond de césure accompagnent ce travail d'inscription.

Les façades sont conçues pour éviter les ponts thermiques. Ainsi, pour la façade sur rue, des rails



métalliques sont fixés à la structure et les panneaux de façade préfabriqués sont accrochés sur ces rails. Cela permet d'obtenir un vide de 10 cm entre la dalle de plancher et chaque panneau pour réaliser la rupture de pont thermique. Une première couche d'isolant en laine de verre est mise en place dans l'espace libre de 10 cm et sur toute la hauteur des panneaux. Une couche supplémentaire de 20 cm d'isolant est rajoutée, ce qui donne au final une isolation thermique intérieure de 30 cm sur cette façade. Les panneaux préfabriqués ont une épaisseur de 12 cm.



Vue de la façade sud-ouest du bâtiment en cœur de parcelle.

Les façades sud-ouest des deux corps de bâtiment présentent le même aspect. Ces façades sont protégées du rayonnement solaire direct par un brise-soleil en béton. Les éléments porteurs verticaux sont coulés en place, tandis que les lignes horizontales sont constituées de dalles préfabriquées.

DES TOITURES VÉGÉTALISÉES

Dernier élément de la gestion thermique, le corps de bâtiment situé au cœur de l'îlot est doté d'une **toiture végétalisée** (inertie et isolation thermique).



1.4.4 - Immeuble de logements, Lyon Confluence

Lyon (69002)

Maître d'ouvrage : OPAC du Rhône

Maîtrise d'œuvre : Emmanuelle Colboc architecte ;

Michael Zwerger chef de projet

Livraison : 2012

LE PROJET ARCHITECTURAL

L'ensemble résidentiel conçu par l'architecte Emmanuelle Colboc dans le nouveau quartier de Lyon-Confluence comprend 66 logements, dont 36 en locatif social et 30 en accession sociale à la propriété. Le projet, inscrit dans une démarche HQE élevée, atteint le niveau basse consommation

(BBC) et répond ainsi aux objectifs de cette opération de renouvellement urbain labellisée « quartier durable WWF ». Le bâtiment présente des façades ventilées isolées par l'extérieur mettant en œuvre un système de plaques en ciment avec une armature en fibre de verre, recouvertes d'un enduit de couleur blanc calcaire. Cette réalisation à la volumétrie équilibrée et dynamique prend place de façon juste et harmonieuse dans le paysage urbain.

CONCEPTION HQE®

La conception du projet s'inscrit dans une démarche HQE élevée et bioclimatique pour les apports solaires. Les séjours sont majoritairement orientés au sud. Un soin particulier est apporté à l'éclairage naturel des pièces afin de réduire la consommation d'énergie électrique. Les vitrages



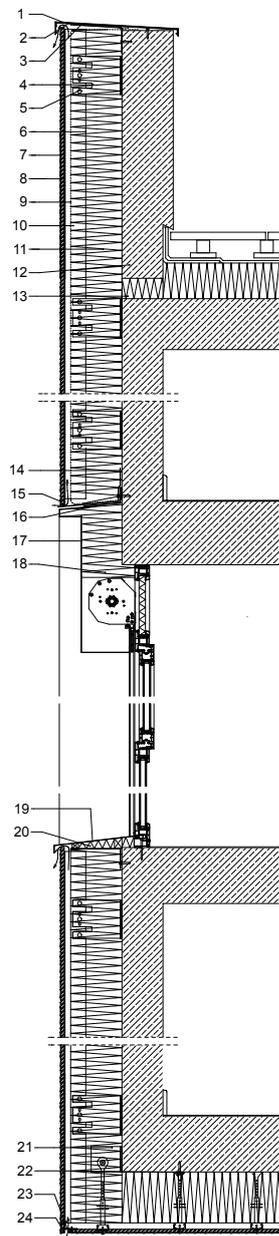


optimisent les apports solaires. Des rupteurs de ponts thermiques sont mis en œuvre au niveau des balcons et terrasses. Des panneaux solaires sont installés en toiture pour la production d'eau chaude sanitaire. Les toitures visibles ou non accessibles sont végétalisées ou traitées en jardinières. Les eaux pluviales sont récupérées et utilisées pour alimenter les chasses d'eau des toilettes des appartements en location sociale. Le long des voies ferrées, la paroi de façade en béton, associée au complexe isolant par l'extérieur, assure l'affaiblissement de 40 dB exigé pour protéger les logements des nuisances sonores liées au passage des trains.

BÉTON COULÉ EN PLACE ET ITE

Dans cette opération, façades et refends sont en béton coulé en place. Pour atteindre le niveau BBC, le bâtiment a des façades ventilées isolées par l'extérieur. Le complexe isolant de 20 cm d'épaisseur en laine de roche est fixé directement à l'aide de chevilles étoiles sur la façade en béton et est recouvert d'un pare-pluie. L'ensemble est protégé par un système de plaques de 12 mm d'épaisseur en ciment avec une armature en fibre de verre. Ces plaques sont fixées par des vis auto-foreuses sur

une ossature de profilés en aluminium, elle-même accrochée à la façade en béton. Les plaques sont posées en quinconce afin d'éviter tout effet de joint vertical. Une lame d'air de 2 à 2,5 cm est ménagée entre le complexe isolant et les plaques. Une fois le montage des plaques terminé, les joints sont camouflés à l'aide de bandes armées. Ce parement de plaques compose des surfaces planes et homogènes recouvertes d'un enduit de couleur blanc calcaire. Cette solution permet d'obtenir un rendu de matière identique à l'enduit classique sur béton, tout en ayant une isolation thermique par l'extérieur très performante. De plus, grâce à la solidité des plaques en ciment avec armature en fibre de verre, la peau de façade se distingue par sa résistance aux dégradations éventuelles et présente ainsi une grande pérennité.



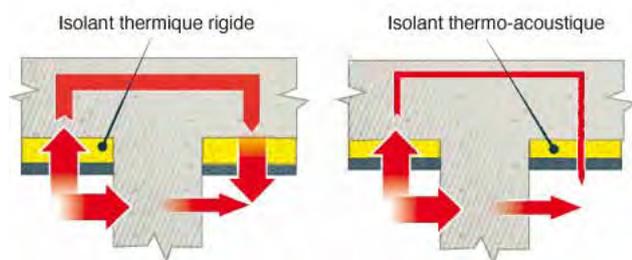
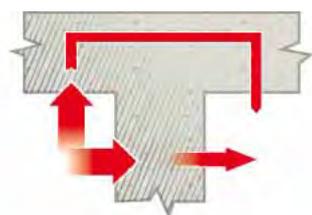
Coupe de détail

1. Couvertine zinc
2. Patte de fixation
3. Cornière acier galvanisé
4. Équerre de fixation WLR 150
5. Fixation par rivet
6. Rail Façalu T80
7. Enduit, finition Sto Lotusan
8. Plaques Aquapanel
9. Lame d'air
10. Pare-pluie
11. Isolant laine de verre ISO façade noir 32 R 2 x 100
12. Béton
13. Rupteur de pont thermique
14. Membrane bitumineuse
15. Profil d'arrêt en PVC
16. Précadre acier galvanisé
17. Tableau de finition en tôle acier thermolaquée
18. Laine de roche
19. Bavette en tôle acier thermolaquée
20. Laine minérale
21. Équerre de fixation
22. Suspente
23. Profil anti-rongeurs
24. Profil goutte d'eau

2. Béton et confort acoustique

Une autre réglementation joue sur le confort des occupants et doit être respectée : c'est la **réglementation acoustique**. Or un bon système d'isolation thermique n'est pas nécessairement un bon système pour l'isolation acoustique... **Il arrive fréquemment que ce soit le contraire.**

Ainsi, par exemple, une isolation rigide, appliquée sur les parois verticales, comparable aux cloisons légères et rigides, peut **amplifier les sons** *via* la paroi elle-même (transmission directe), mais aussi *via* les transmissions latérales.



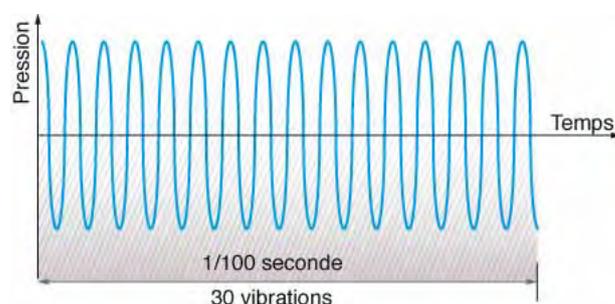
Incidence d'un doublage thermique

2.1 - Le son, qu'est-ce que c'est ?

Un son est une vibration de l'air, elle-même engendrée par la vibration d'un corps solide. L'onde ainsi créée se propage dans l'espace et rencontre des obstacles qui vont la modifier, la dévier, l'amplifier ou l'absorber.

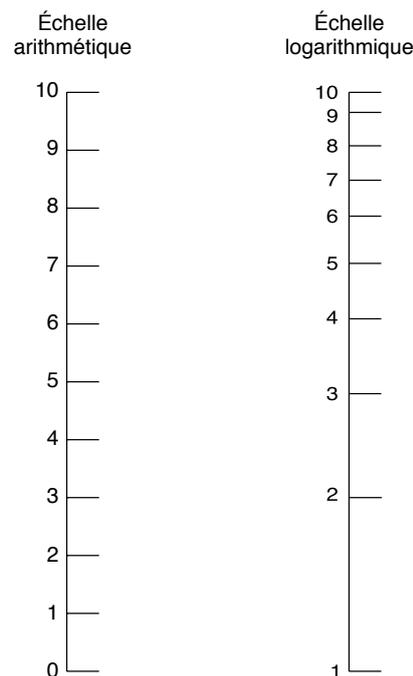
Un son est caractérisé par son intensité et sa fréquence :

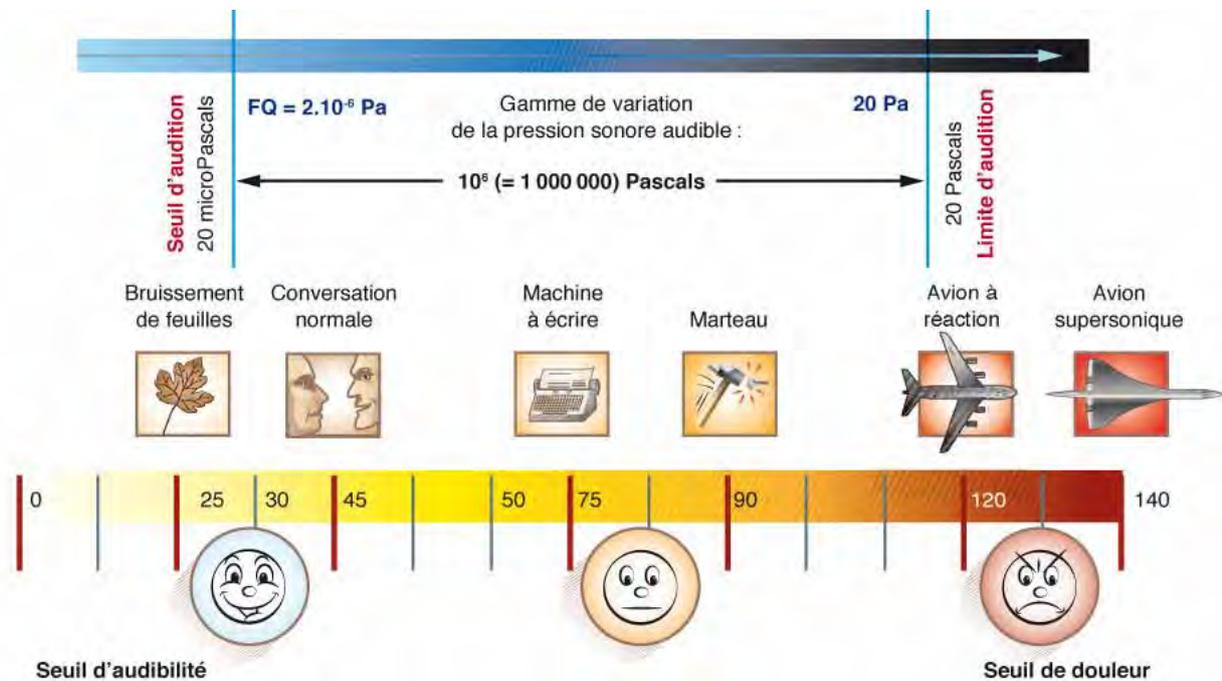
- son **niveau d'intensité** (L_i) ou son niveau de pression (L_p) est exprimé en **décibels** (dB) ;
- sa **fréquence** est exprimée en **hertz** (Hz), elle traduit le caractère grave ou aigu du son.



Plus l'intensité acoustique augmente (ou diminue), et plus la sensation de force sonore augmente (ou diminue).

Pour exprimer la sensation de force sonore engendrée par l'ensemble des intensités de sons possibles, on utilise une **échelle logarithmique** : le décibel (dB).





Exemples de niveaux de pression acoustique en dB

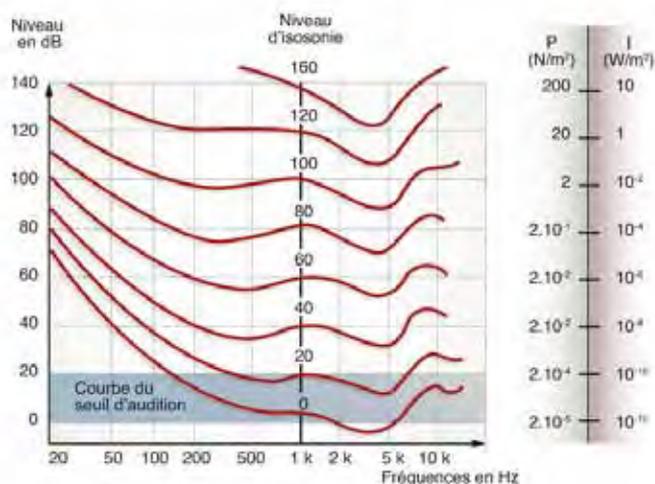
L'échelle logarithmique des décibels est conçue de telle manière que la plus petite variation de bruit perceptible corresponde à une variation de 1 dB. Ainsi, 1 dB correspond au seuil de perception différentielle et correspond à une d'intensité acoustique de 25 %.

L'oreille humaine perçoit des sons de 0 dB (seuil d'audibilité) à 120 dB (seuil de douleur).

Le schéma ci-dessus permet de comparer l'échelle des variations de pression audibles par l'oreille à celle des bruits exprimés en décibels : l'échelle des pressions varie de 2.10^{-6} Pascal à 20 Pascal, et l'échelle en décibels varie de 0 à 120 dB.

Nous avons vu qu'un son est caractérisé par son intensité (son niveau de pression) et par sa fréquence. L'oreille est sensible à des variations de fréquence entre 20 et 10 000 Hz, mais cette sensibilité n'est pas la même en fonction de la fréquence. En effet, l'oreille filtre.

Pour tenir compte de la variation de sensibilité de l'oreille humaine, les fréquences sont organisées en plages, ordonnées de façon régulière pour l'oreille, ce sont les bandes **d'octave**. **Quand on passe d'une octave à une autre, la sensation auditive de la fréquence est doublée.** Ces bandes d'octave sont au nombre de 10.



Courbes d'égale sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence

Bandes d'octave en Hz

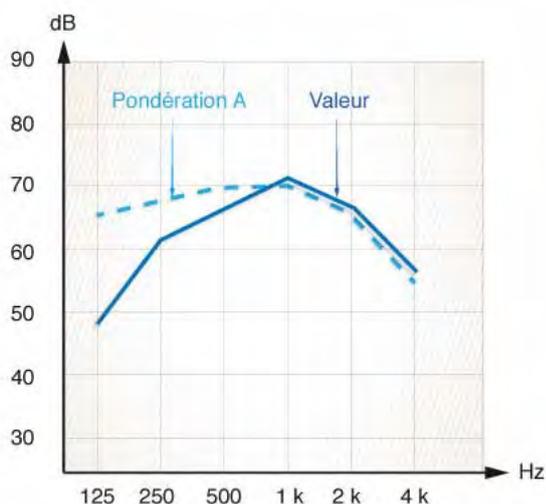
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
------	----	-----	-----	-----	------	------	------	------	-------

2.2 - Le bruit, qu'est-ce que c'est ?

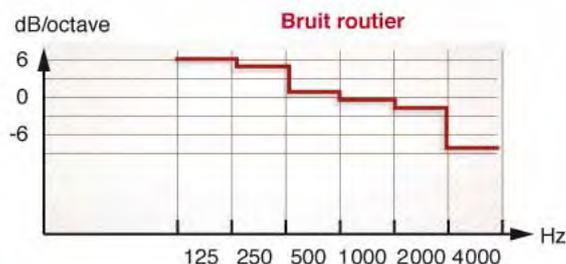
Tout ceci serait facile si le bruit ne correspondait qu'à un seul son. En réalité le bruit est un **mélange** de sons.

On représente un bruit par son spectre, c'est-à-dire par le niveau sonore (en décibels) de ce bruit pour chaque bande de fréquences ou octave.

De plus, pour tenir compte de la sensibilité de l'oreille, on applique des termes correctifs.



De même, pour les études d'isolement acoustique des façades au bruit routier, un bruit standardisé a été créé, **le bruit route** (bruit normalisé simulant un bruit routier ou ferroviaire). Il est plus riche en graves que le bruit rose. L'énergie contenue dans chaque bande d'octave est fixée par rapport à l'énergie contenue dans la bande d'octave centrée sur 1 000 Hz.



Différentes courbes de pondération sont également utilisées pour tenir compte de la variation de sensibilité selon la fréquence (faible réception aux fréquences très basses et très élevées) :

- pondération A : niveaux faibles (jusqu'à 60 dB) ;
- pondération B : niveaux moyens (de 60 à 90 dB) ;
- pondération C : niveaux forts (au-delà de 90 dB).

Le plus souvent, nous trouverons la **courbe de pondération A** qui correspond le mieux à la modélisation de l'oreille humaine dans un logement.

2.2.2 - Maîtriser l'acoustique dans le bâtiment

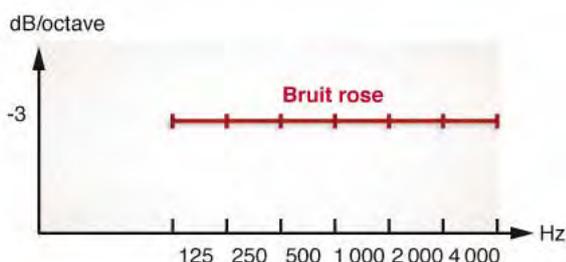
Maîtriser l'acoustique dans le bâtiment veut dire protéger les occupants contre :

- les bruits aériens extérieurs ;
- les bruits aériens intérieurs ;
- les bruits des équipements ;
- les bruits de choc ;

tout en maîtrisant **la réverbération** des locaux.

2.2.1 - Des bruits normalisés

Afin de faciliter les études d'isolement acoustique aux bruits aériens extérieurs et intérieurs, un bruit normalisé a été créé, **le bruit rose** : l'amplitude décroît avec la fréquence de 3 dB/octave (mesure de l'isolement à l'intérieur d'un bâtiment ou d'une façade à un bruit d'avion).



- | | |
|---|---|
| ■ Bruits extérieurs | ■ Bruits aériens intérieurs, conversation |
| ■ Bruits d'équipements | ■ Bruits d'impact intérieurs |
| ■ Réverbération | |

2.3 - La réglementation acoustique

La réglementation acoustique des bâtiments d'habitation a évolué en 1994 et 1995 et ces textes sont appliqués depuis janvier 1996. La normalisation européenne doit maintenant être utilisée pour calculer les indices uniques d'évaluation de la performance acoustique des produits et des ouvrages, respectivement pour les bruits aériens, intérieurs ou extérieurs, et pour les bruits de choc.

2.3.1 - Les textes réglementaires

Les nouveaux textes réglementaires en application pour les bâtiments d'habitation sont :

- l'arrêté du 30 mai 1996 relatif à l'isolement acoustique des bâtiments d'habitation dans les secteurs affectés par le bruit, dont la révision est prévue ;
- l'arrêté du 30 juin 1999 relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments d'habitation ;
- l'arrêté du 30 juin 1999 relatif aux modalités d'application de la réglementation acoustique.

Depuis le 1^{er} janvier 2000, les performances acoustiques des produits et des constructions s'expriment à l'aide d'indices uniques utilisés par tous les États membres de l'UE. Seule a changé la méthode de calcul, non la qualité acoustique des bâtiments (réglementation de 1996). En France, cette uniformisation des indices n'a entraîné de changement que pour les indices (classement en dB avec disparition des indices associés).

	Isolation aux bruits aériens intérieurs	Isolation aux bruits aériens extérieurs (routes)
Ancien indice	D _{nAt}	D _{nAt}
Unité	dB(A)rose	dB(A)
Nouvel indice	D _{nT,A}	D _{nT,A,tr}
Unité	dB	dB(A)

	Circulations communes (absorption)	Bruits de choc	Bruits d'équipement
Ancien indice	α_w	L _{nAt}	L _{nAt}
Unité	sans	dB(A)	dB(A)
Nouvel indice	<i>inchangé</i>	L _{nT,w}	<i>inchangé</i>
Unité		dB	

Un arrêté publié le 18 décembre 2012 fixe les modalités d'établissement de **l'attestation de prise en**

compte de la réglementation acoustique par les bâtiments d'habitation neufs. L'obligation d'établir cette attestation s'applique aux bâtiments dont le permis de construire est demandé à compter du 1^{er} janvier 2013. Elle concerne les bâtiments collectifs et, lorsqu'elles font l'objet d'un même permis de construire, les maisons individuelles accolées ou contiguës à un local d'activité. L'attestation est à transmettre par le maître d'ouvrage à l'autorité administrative ayant délivré le permis de construire. Elle doit être jointe à la déclaration d'achèvement des travaux.

2.3.2 - Mesures acoustiques à l'achèvement des travaux

Le texte, pris pour application de **l'article R. 111-4-2 du Code de l'environnement**, précise les modalités d'établissement de l'attestation et en fixe le modèle. Il définit également les mesures acoustiques à réaliser à l'achèvement des travaux.

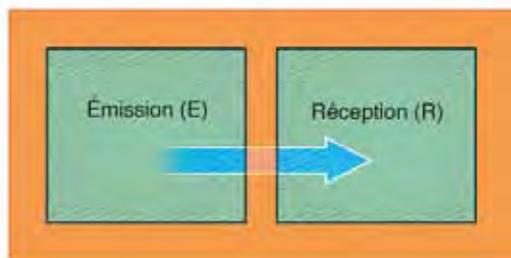
Les constats doivent être effectués en phase d'études et de chantier, ainsi que, pour les opérations d'au moins dix logements, sur des mesures acoustiques réalisées à l'achèvement des travaux. Ces mesures doivent porter sur les différents types de bruits suivants : bruits aériens extérieurs, bruits aériens intérieurs, bruits de choc, bruits d'équipements, et sur la présence de matériaux absorbants en circulations communes.

2.3.3 - Isolement acoustique standardisé pondéré au bruit aérien vis-à-vis des bruits de l'espace extérieur

Cet **isolement acoustique standardisé vis-à-vis des bruits extérieurs** est exprimé par l'indice **D_{nT,A,tr}** (NF EN ISO 717-1) :

- D_{nT} est l'isolement (D) normalisé (ou standardisé) (n) par rapport à la durée de réverbération (T = 0,5 s) ;
- l'indice « A », signifie qu'on a utilisé la courbe de pondération (A) pour l'évaluation des niveaux ;
- l'indice « w » signifie qu'on utilise un gabarit « w » pour l'évaluation.

Il correspond à la valeur de l'isolement de l'enveloppe du bâtiment et des conditions de montage. Il est calculé à partir des indices d'affaiblissement acoustique R_w des parois. Les valeurs sont exprimées en dB.



$$D_{nT} = LE - LR + 10 \log Tr/0,5$$

LE = Niveau (L) à l'émission (E)

LR = Niveau (L) à la réception (R)

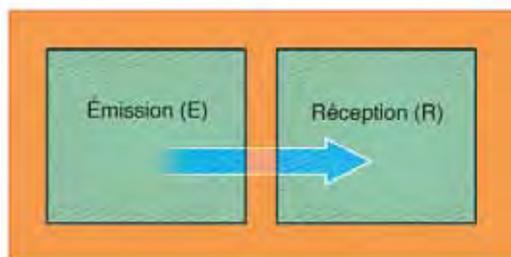
Tr = Durée de réverbération du local de réception en secondes

2.3.4 - Bruit de choc standardisé

Le **niveau de bruit de choc standardisé** est exprimé par l'indice $L_{n,T,w}$ (NF EN ISO 717-2) :

- L_{nT} est le niveau reçu (L) (en provenance d'un équipement) normalisé (ou standardisé) (n) à la durée de réverbération ($T = 0,5$ s) ;
- l'indice « A » signifie qu'on a utilisé la courbe de pondération (A) pour l'évaluation des niveaux ;
- l'indice « w » signifie qu'on utilise un gabarit « w » pour l'évaluation.

Il correspond au niveau de bruit perçu dans le local de réception et transmis par une machine à chocs normalisée disposée sur le plancher du local d'émission. Les valeurs sont exprimées en dB.



$$L_{nT} = Ln - 10 \log Tr/0,5$$

Ln = niveau reçu (en provenance d'un équipement)

Tr = durée de réverbération du local de réception en secondes

2.3.5 - Les valeurs réglementaires pour le bâtiment

À chacun de ces principaux indices correspond une valeur (ou une plage) réglementaire à respecter.

Valeurs réglementaires pour les bâtiments d'habitation	
Bruits aériens intérieurs (Article 2)	Entre 2 pièces principales $D_{nT,A} = 53$ dB
Bruits de choc (Article 4)	$L_{nT,w} = 58$ dB
Bruits d'équipement (Articles 5 et 6)	En pièce principale $L_{nAT} = 30$ dB(A)
Bruits aériens extérieurs (Article 5 et 6)	$D_{nAT} = 30$ dB

Avec :

$D_{nT,A}$: isolement acoustique standardisé pondéré (A) pour les bruits aériens, exprimé en dB.

D_{nAT} : isolement acoustique normalisé pondéré (A) pour les bruits aériens, exprimé en dB(A), en attendant la révision de l'arrêté du 30 mai 1996.

$L_{nT,w}$: niveau de pression pondéré « w » des bruits de choc, standardisé, exprimé en dB.

L_{nAT} : niveau de pression pondéré des bruits de choc, standardisé, exprimé en dB(A).

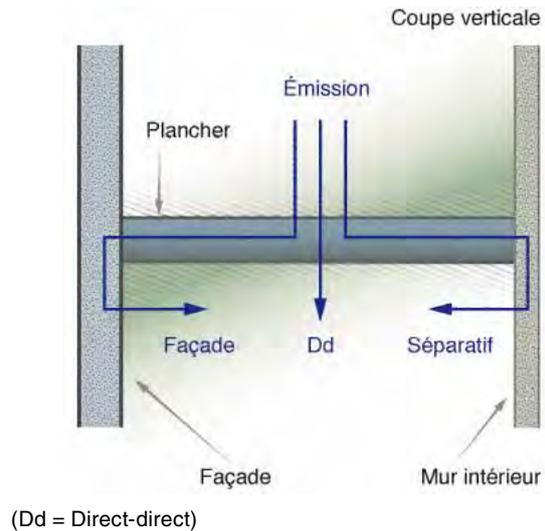
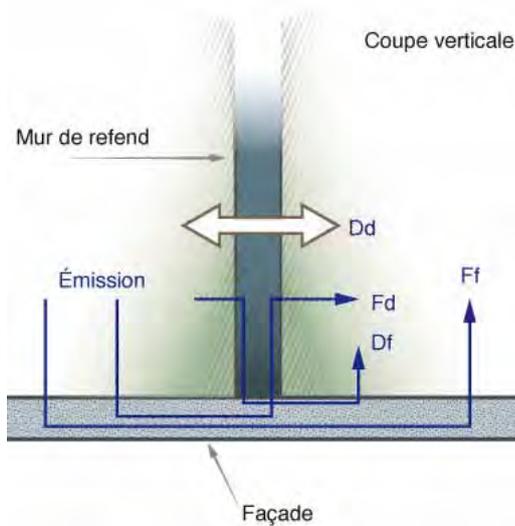
2.4 - Affaiblissement acoustique et isolement

2.4.1 - Pour les bruits aériens

Pour les bruits aériens, trois types de transmissions sont à prendre en compte :

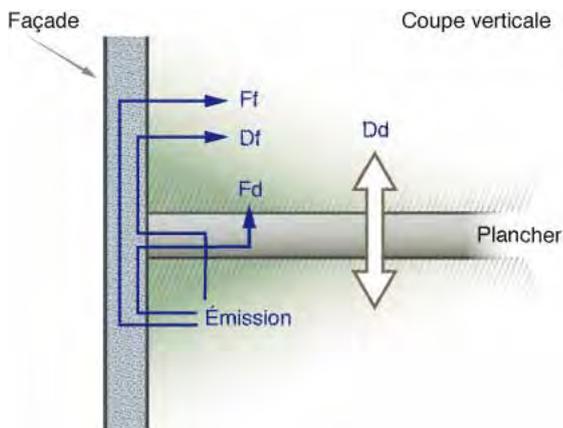
- **transmissions directes (TD)** : par les parois opaques (façade, séparatif, toiture et plancher) et les baies ;
- **transmissions latérales (TL)** : par les parois liées à la façade, à la paroi séparative, à la terrasse ou au plancher ;
- **transmissions parasites (TP)** : par certains points singuliers (gaines techniques, VMC, entrées d'air, coffres de volets roulants, défauts d'exécution...).

Voies de transmission du bruit entre deux locaux adjacents :



(Dd = Direct-direct)

Voies de transmission du bruit entre deux locaux superposés :



Transmissions directes (TD) :

- Dd = direct direct
- Df = direct flanking

Transmissions latérales (TL) :

- Fd = flanking direct
- Ff = flanking-flanking

D_{nT} = somme de toutes les voies de transmission

2.4.2 - Pour les bruits de choc

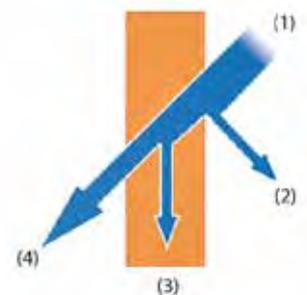
Deux voies de transmissions sont à prendre en compte :

- **Transmissions directes (TD)** : par les parois opaques (façade, séparatif, toiture et plancher) et les baies ;
- **Transmissions latérales (TL)** : par les parois liées à la façade, à la paroi séparative, à la terrasse ou au plancher.

2.4.3 - Isolation acoustique et absorption acoustique, deux actions différentes

L'isolation est l'ensemble des procédés mis en œuvre pour réduire le niveau sonore dans le local contigu au local d'émission.

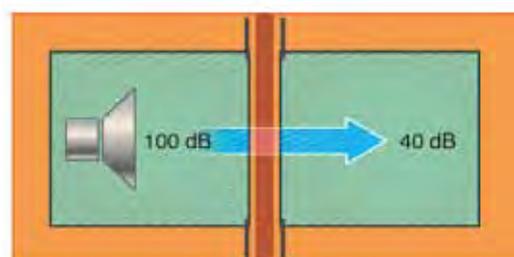
Une onde sonore (1) rencontrant une paroi est en partie **réfléchie (2)**, **absorbée (3)**, **transmise (4)**.



Un matériau absorbant augmente la partie absorbée et réduit la partie réfléchie du bruit dans le local où il est placé. Mais ce type de matériau n'a pratiquement aucune influence sur la partie transmise. **L'absorption ne permet donc pas l'isolation de manière décisive.**

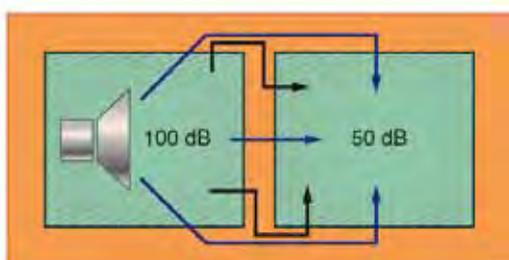
2.4.4 - Ne pas confondre indice d'affaiblissement et isolement

• **L'indice d'affaiblissement acoustique, noté R**, caractérise la qualité acoustique d'un élément de construction (paroi, fenêtre, porte...).



• **L'isolement, noté D**, représente la valeur de l'isolation entre deux locaux ou entre l'extérieur et un local. L'isolement entre locaux est égal à l'indice d'affaiblissement R de la paroi séparatrice, diminué des transmissions latérales (a) :

$$D = R - a$$



Les transmissions latérales sont en règle générale prépondérantes. C'est pourquoi, pour déterminer un isolement « horizontal », on doit se préoccuper des partis pris constructifs « verticaux » et réciproquement. Il faut faire la différence entre isolement brut et isolement normalisé.

L'isolement brut (D) est la différence entre le niveau de bruit (L1) dans un local d'émission et le niveau (L2) dans un local de réception : $D = L1 - L2$.

Mais le niveau L2 dans le local de réception (et donc l'isolement brut) dépend de la **durée de réverbération** du local de réception. Celle-ci varie suivant que la pièce est vide ou meublée, et en fonction de l'ameublement lui-même. C'est pourquoi les valeurs d'isolement contractuelles ou réglementaires sont exprimées en **valeurs normalisées**, permettant de s'affranchir de la durée réelle de réverbération.

L'isolement normalisé est l'isolement brut corrigé en fonction de la durée de réverbération réelle (T) mesurée dans le local de réception et une durée de réverbération de référence (T0) :

$$D_{nT} = D + \text{Log } T/T_0.$$

Quelques exemples pour T0 :

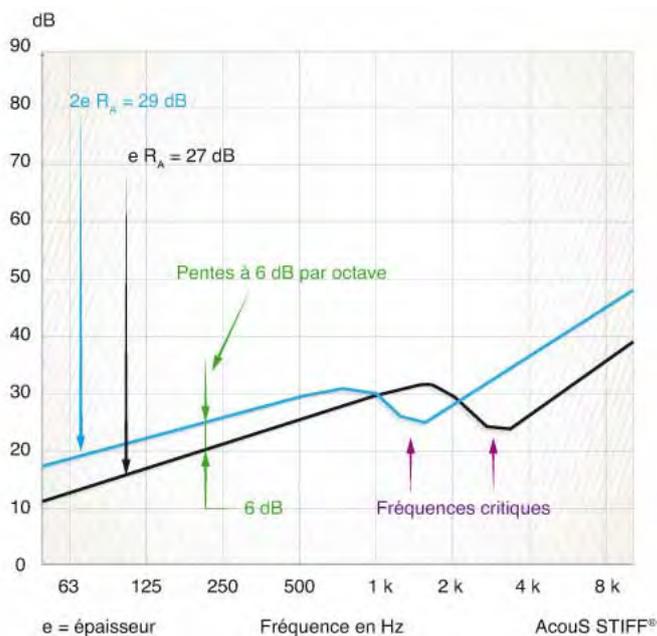
- bâtiments d'habitation, santé, hôtels et enseignement : T0 = 0,5 seconde ;
- salle de sport de volume supérieur à 512 m³ : T0 = 0,14 V^{1/3} (avec V le volume de la pièce).

En l'absence de prescriptions réglementaires :

- pour V < 50 m³ : T0 = 0,5 seconde ;
- pour V > 50 m³ : T0 = t0.V/V0 (avec t0 = 1 seconde et V0 = 100 m³).

2.5 - Transmission acoustique à travers une paroi simple

Les parois simples sont constituées d'un **seul matériau** (béton, carreau de plâtre, bloc béton, brique...). Leur indice d'affaiblissement R n'est, en première approximation, **fonction que de leur masse surfacique (en kg/m²) et de la fréquence (loi de masse)**. On observe une croissance régulière de l'indice R avec la fréquence, à raison de **6 dB par octave**.



Évolution de l'affaiblissement acoustique en fonction des fréquences

La loi masse théorique montre que **R augmente** à chaque fois que l'on **augmente la masse surfacique de la paroi**. En fait, l'indice d'affaiblissement acoustique d'une paroi simple dépend aussi de sa rigidité à la flexion. Celle-ci introduit une chute d'isolement à une certaine fréquence, dite critique.

Plus la paroi est rigide, plus la fréquence critique est basse. Plus elle est souple, et plus la fréquence critique est élevée.

On remarque que l'efficacité d'une paroi simple augmente avec la fréquence. Elle est plus faible aux fréquences basses, ce qui veut dire qu'en général les parois laissent passer les sons graves. Toutefois, la résistance acoustique devient bien plus vite intéressante pour les parois épaisses, ce qui veut dire que seules les parois en maçonnerie lourde auront un affaiblissement acoustique satisfaisant. Si l'on utilise d'autres matériaux, la seule alternative est la paroi double.

2.6 - Transmission acoustique à travers une paroi double

Les parois doubles sont constituées de deux parois simples séparées par une lame d'air. Cette lame d'air peut être comblée avec un matériau.

L'indice d'affaiblissement acoustique R de ces parois est fonction des caractéristiques suivantes: la masse de chaque parement, l'épaisseur de la lame d'air, l'épaisseur et la nature du matériau dans la lame d'air, la fréquence critique de chaque parement, le type des liaisons (ponctuelles, linéiques, surfaciques), leur nombre et leur nature (rigides, souples...) (**loi masse-ressort-masse**).

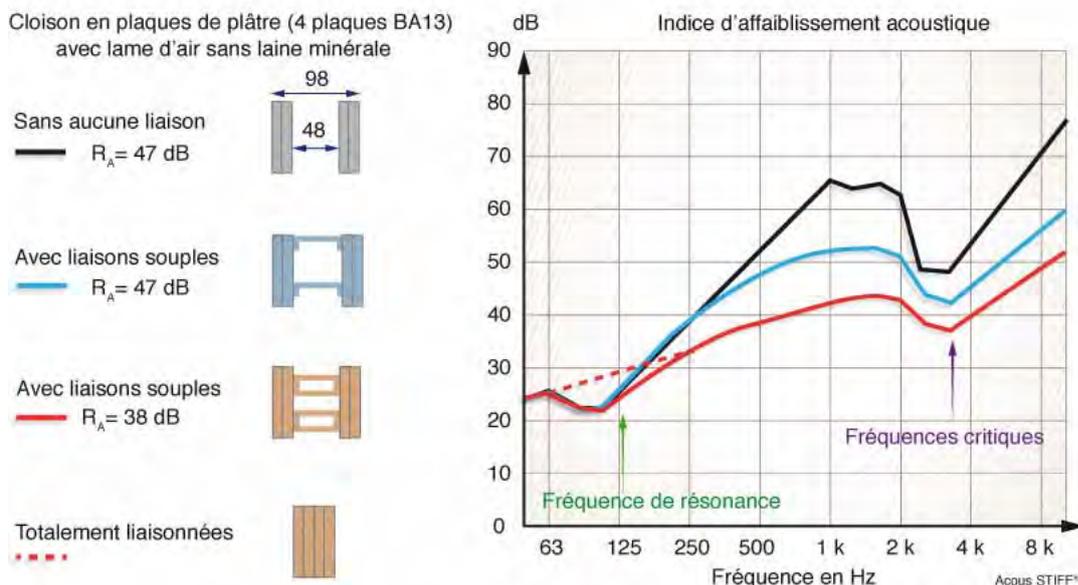
Pour une paroi double, l'indice d'affaiblissement acoustique R atteint son minimum aux environs d'une fréquence appelée fréquence de résonance (f_0) et croît rapidement au-delà de cette fréquence, à condition que les liaisons soient faibles. Il sera donc conseillé de maintenir f_0 dans les fréquences les plus basses, c'est-à-dire en dehors de la gamme des fréquences usuelles et de limiter les liaisons entre parements.

À titre d'illustration, le graphique ci-dessous montre l'influence de la nature des liaisons entre les deux parois.

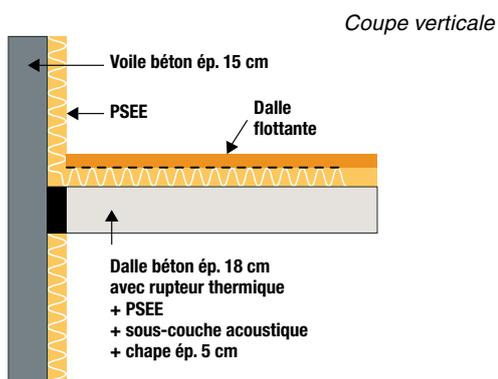
Le béton

Le béton, matériau lourd, bénéficie naturellement des propriétés acoustiques liées à sa masse, en particulier un isolement important, principalement aux bruits aériens. Comme le montre une récente étude réalisée par le cabinet Gamba, dans le cas d'un isolement acoustique entre deux locaux, la mise en œuvre d'éléments de façade et de refends en béton coulé en place ou préfabriqué limitera non seulement la transmission du bruit par la paroi de séparation des deux locaux, mais également par les parois latérales (façade, cloisons de distribution) (RA 67 dB).

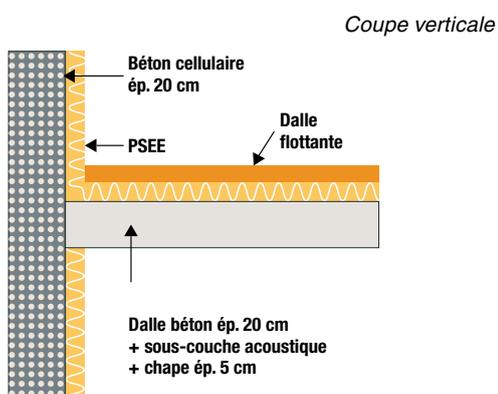
Ce type de système constructif, très homogène, offre des indices d'affaiblissement acoustique élevés, en particulier dans les basses fréquences (ce qui est important pour traiter les bruits routiers riches en basses fréquences).



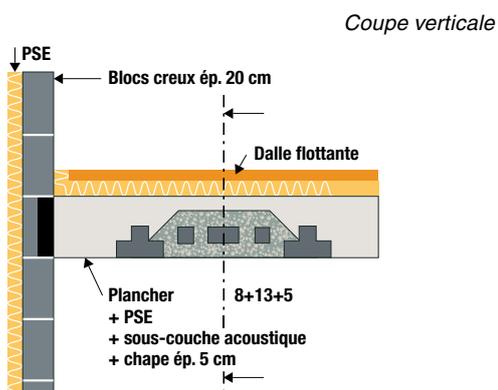
Principe de la paroi en double sans laine de verre



Dalle flottante sur sous-couche acoustique, dalle BA 18, voile BA 15 en façade, isolation thermo-acoustique intérieure (PSEE), refend en BA 18.



Dalle BA 20 cm + dalle flottante sur sous-couche acoustique, voile BCA 20 cm en façade, isolation thermo-acoustique intérieure (PSEE), refend en BA 18 cm.



Dalle poutrelles + hourdis (8+13+5) + dalle flottante sur sous-couche acoustique façade en bloc creux 20 cm, isolation thermo-acoustique extérieure (PSE), refend en blocs à bancher 20 cm.

Exemples de structures béton performantes

Le fait que le béton soit lourd permet également de limiter la génération, puis la transmission des vibrations. Par exemple, si l'on souhaite accrocher des éléments vibrants à une paroi (chaudière, pompe, ventilateur), l'utilisation du béton permettra de limiter la transmission du bruit émis lors de leur fonctionnement. De la même façon, des gaines techniques en béton, par exemple pour les ascenseurs, ou les descentes d'eau, permettent d'en réduire les nuisances sonores.

De même, les parois réalisées en blocs béton (pose collée ou hourdée) doublées d'un isolant acoustique (laine de verre ou PSEE) présentent une courbe d'affaiblissement acoustique très élevée, en particulier dans les basses fréquences. Système très hétérogène mais lourd, contenant beaucoup d'air, et rigidifié par le doublage, son comportement acoustique est excellent (loi masse-ressort-masse) (RA 70 dB).



Bloc de pierre ponce



Bloc à bancher



Bloc de chanvre

Les blocs à isolation renforcée, à base de granulats légers et donc moins lourds, présentent des courbes d'indices d'affaiblissement moins performantes avec plus de fréquences de résonance basse et moyenne fréquence. Cependant le résultat global (RA 59 dB) est très suffisant et permet d'atteindre sans aucune difficulté les performances réglementaires.

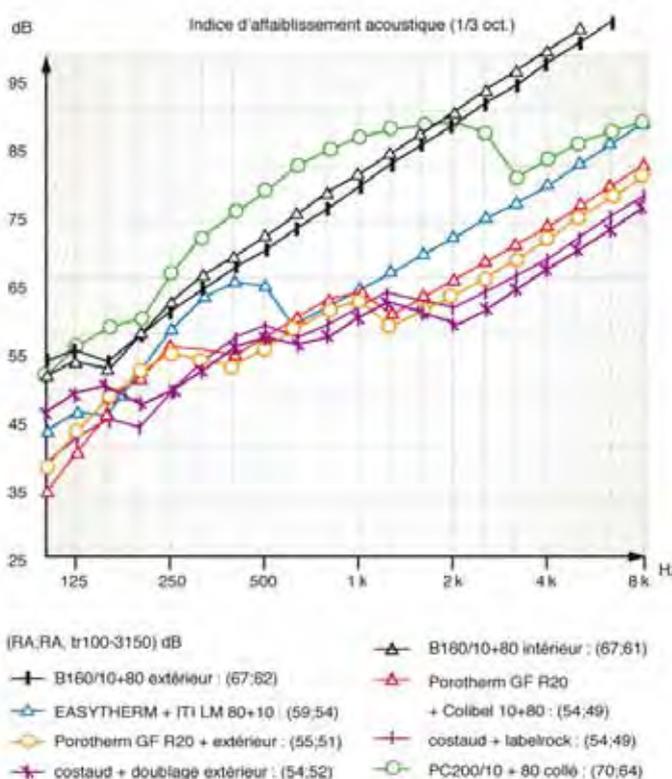
Dans le cas de matériaux plus anisotropes (comme certaines briques isolantes), le comportement acoustique des murs et cloisons est alors plus « chahuté » : il présente de nombreuses fréquences de résonance et un résultat global moins bon (brique de 20 classique : RA de 54 dB et brique isolante RA de 55 dB) (masse moins importante).

bruits aériens. Il est cependant obligatoire de traiter les bruits de choc (pas ou talons sur les planchers).

Deux techniques sont employées, soit la pose de revêtements de sol absorbants posés sur une sous-couche résiliente, soit la mise en place de dalles flottantes sur isolants thermo-acoustiques désolidarisant la chape du plancher du reste de la structure.

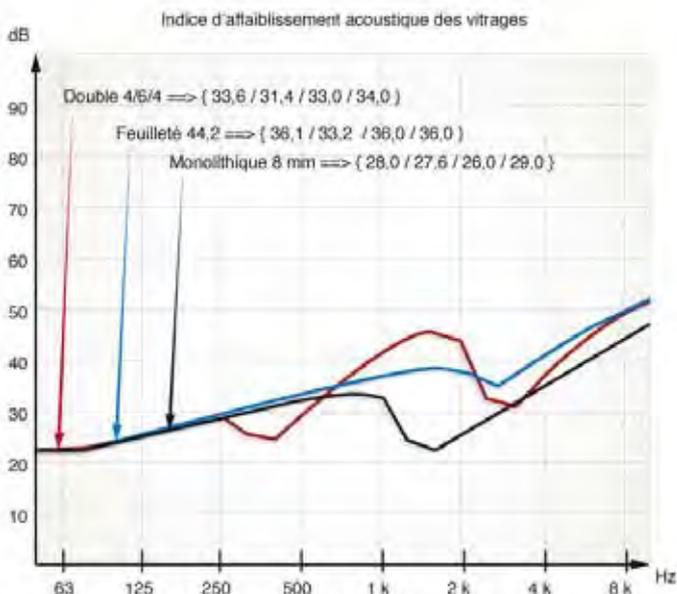
2.7 - Transmission acoustique à travers un vitrage

Le schéma ci-après montre de façon extrêmement claire l'intérêt des **vitrages feuilletés** : à masse surfacique égale, un vitrage feuilleté a très souvent un affaiblissement acoustique supérieur à un double vitrage composé de vitrages identiques avec lame d'air, mais il est moins isolant du point de vue thermique. Des performances importantes sont obtenues avec des vitrages doubles comportant des verres feuilletés acoustiques.



Comparatif de l'indice d'affaiblissement des façades pour différents matériaux utilisés

De même pour les éléments de plancher en béton couramment rencontrés (dalles pleines, poutrelles hourdis plus dalles de compression, prédalles plus dalles de compression), la présence d'une épaisseur de béton importante nécessaire pour reprendre les efforts mécaniques augmente la masse des systèmes constructifs et améliore leurs caractéristiques d'affaiblissement acoustique aux



Transmission acoustique à travers différents vitrages

Les performances acoustiques d'une fenêtre sont également liées à la nature du matériau constituant la menuiserie. Quels que soient l'huissierie et le vitrage, la performance finale dépend de la parfaite étanchéité de la fenêtre.

2.8 - Maîtriser la qualité acoustique d'un bâtiment

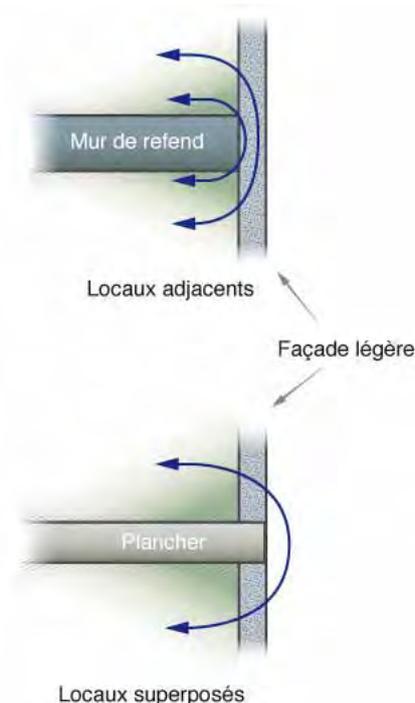
2.8.1 - Les façades

La composition de la façade est déterminante. C'est la combinaison des indices d'affaiblissement des matériaux utilisés qui donnera la performance de la façade.

L'isolement acoustique d'une façade est essentiellement déterminé par le rapport surface opaque sur surface vitrée ; bien entendu, la qualité des vitrages et les entrées d'air, et dans certains cas les coffrages de volets roulants, sont aussi extrêmement importantes.

Pour les parois opaques : suivant la loi de masse vue précédemment, plus la paroi est lourde, plus elle s'oppose à la transmission du bruit. En règle générale, la masse des parois opaques donne un indice d'affaiblissement plus important que celui des fenêtres.

Il faudra particulièrement faire attention aux façades dites « légères » qui sont susceptibles de favoriser la transmission des bruits intérieurs par contournement entre deux locaux adjacents ou superposés.



Affaiblissement de la paroi (dB)									
S béton	S fenêtre	S fenêtre /S paroi	B45 F30	B45 F35	B45 F40	B50 F30	B50 F35	B50 F40	B55 F30
10	0	0	44,8	44,8	44,8	49,8	49,8	49,8	54,8
9	1	0,1	38,7	42,0	44,0	39,4	43,7	47,0	39,7
8	2	0,2	36,3	40,4	43,3	36,6	41,3	45,4	36,8
7	3	0,3	34,7	39,1	42,7	35,0	39,7	44,1	35,0
6	4	0,4	33,6	38,2	42,1	33,7	38,6	43,2	33,8
5	5	0,5	32,7	37,4	41,6	32,8	37,7	42,4	32,8
4	6	0,6	32,0	36,8	41,2	32,0	37,0	41,8	32,0
3	7	0,7	31,3	36,2	40,8	31,4	36,3	41,2	31,4
2	8	0,8	30,8	35,7	40,5	30,8	35,8	40,7	30,8
1	9	0,9	30,3	35,2	40,1	30,3	35,3	40,2	30,3
0	10	1	29,8	34,8	39,8	29,8	34,8	39,8	29,8

Exemple d'abaque représentant l'isolement vis-à-vis des bruits extérieurs, résultant de la combinaison de :

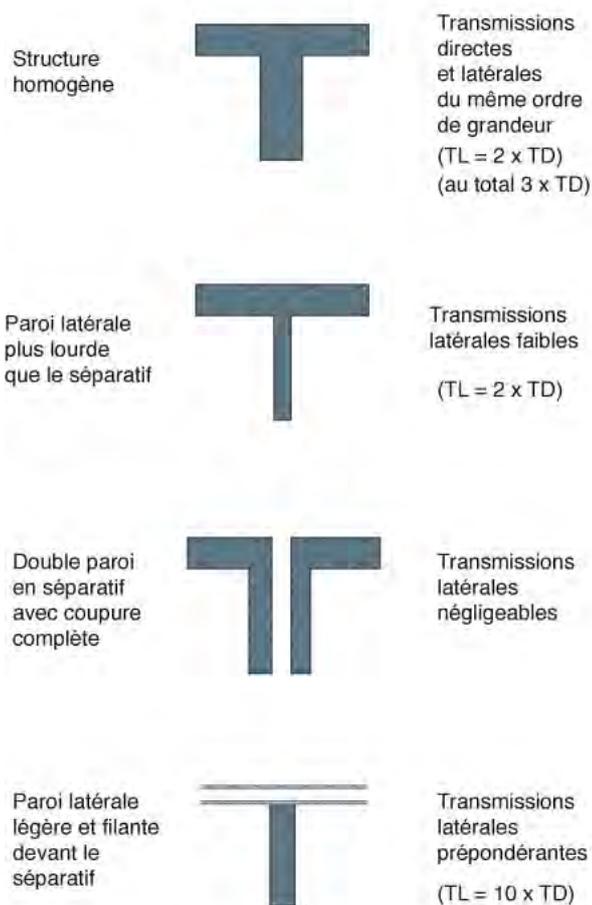
- 3 indices d'affaiblissement de la partie opaque de la façade (dans le cas présent du béton), à savoir : 45, 50 et 55 dB ;
- 3 indices d'affaiblissement de la partie vitrée, à savoir : 30, 35 et 40 dB.

Les hypothèses retenues pour le calcul sont une pièce de 3 mètres de profondeur (perpendiculairement à la façade), 4 mètres de largeur (façade) et 2,50 mètres de hauteur. (À titre indicatif,

30 dB représentent un indice d'affaiblissement « normal » pour une fenêtre actuelle, alors que 40 dB représentent une valeur très élevée, qui n'est obtenue qu'avec des vitrages doubles, feuilletés ou épais, une menuiserie performante et une pose irréprochable.)

Pour une façade sans fenêtre, 45 dB représentent l'isolement que l'on peut atteindre avec un voile béton de 14 cm d'épaisseur, doublé avec un PSE normal et des transmissions latérales conséquentes ; 55 dB représentent l'isolement de ce même voile béton doublé d'un PSE élastifié et des transmissions latérales normales à faibles.

2.8.2 - Les cloisons



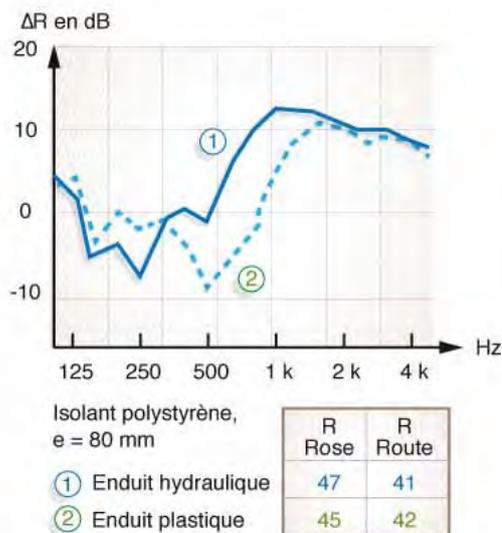
TL = transmissions latérales et TD = transmissions directes

La transmission latérale d'un local à l'autre est favorisée avec certaines cloisons ou contre-cloisons quand elles sont en maçonnerie légère, ainsi qu'avec certains doublages thermiques quand la lame d'air intermédiaire est trop étroite, et/ou quand elle contient un matériau trop rigide.

2.8.3 - Les doublages extérieurs

Le type de doublage extérieur utilisé joue directement sur la performance acoustique de la façade.

Le schéma ci-après illustre le comportement acoustique de procédés « enduit sur isolant » collés sur un mur en béton de 10 cm d'épaisseur, représenté par l'indice R du mur doublé et par le gain ΔR apporté au mur seul. Un enduit plastique a une moins bonne performance qu'un enduit hydraulique (effet masse-ressort-masse).



2.8.4 - Les revêtements de sol

Les revêtements de sol se classent en deux groupes: les revêtements souples (plastiques et textiles) et les revêtements durs (carrelages et parquets).

L'interposition d'une **sous-couche résiliente** ou d'une **dalle flottante** améliorera l'efficacité de l'isolation acoustique aux bruits de choc entre locaux. La dalle flottante présente l'avantage de permettre une excellente performance aux bruits d'impact, indépendamment de tout revêtement de sol: l'utilisateur gagne en liberté de choix.

La mise en place de dalles flottantes représente une avancée majeure tant du point de vue thermique que du point de vue acoustique (dans la mesure où l'on utilise un isolant thermo-acoustique).

En l'absence de dalle flottante, de nombreux contentieux apparaissent avec le voisinage quand un occupant décide de changer son ancien revêtement de sol.

2.8.5 - Les isolants thermiques

Les industriels ont développé des doublages thermo-acoustiques à base de laine minérale ou de PSE élastifié (**PSEE**) qui améliorent l'isolement acoustique, tant direct que latéral, des parois doublées.

Avec de tels doublages utilisés en isolation par l'intérieur, les partis pris constructifs (épaisseur des dalles, des façades ou des refends) sont déterminés en prenant en compte cette amélioration.

Doublage PSE 10+80		
Paroi	RA	Gain
Béton 16 cm	56 dB	
Béton 16 cm + doublage 1 côté	53 dB	- 3 dB
Béton 16 cm + doublage 2 côtés	45 dB	- 11 dB
Doublage PSEE 13+80		
Paroi	RA	Gain
Béton 16 cm	56 dB	
Béton 16 cm + doublage 1 côté	65 dB	9 dB
Béton 16 cm + doublage 2 cotés	70 dB	14 dB

Le doublage « PSE 10 + 80 » a un comportement acoustique « rigide », qui dégrade fortement les performances de la paroi nue.

Le doublage « PSEE 13 + 80 » a un comportement acoustique « souple », qui améliore fortement les performances de la paroi nue.

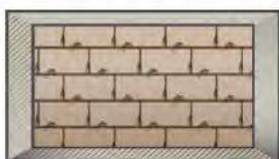
Cependant, dans le cas d'une isolation thermique par l'extérieur, le doublage intérieur disparaît, et avec lui l'amélioration éventuellement apportée.

2.8.6 - Les dispositions constructives

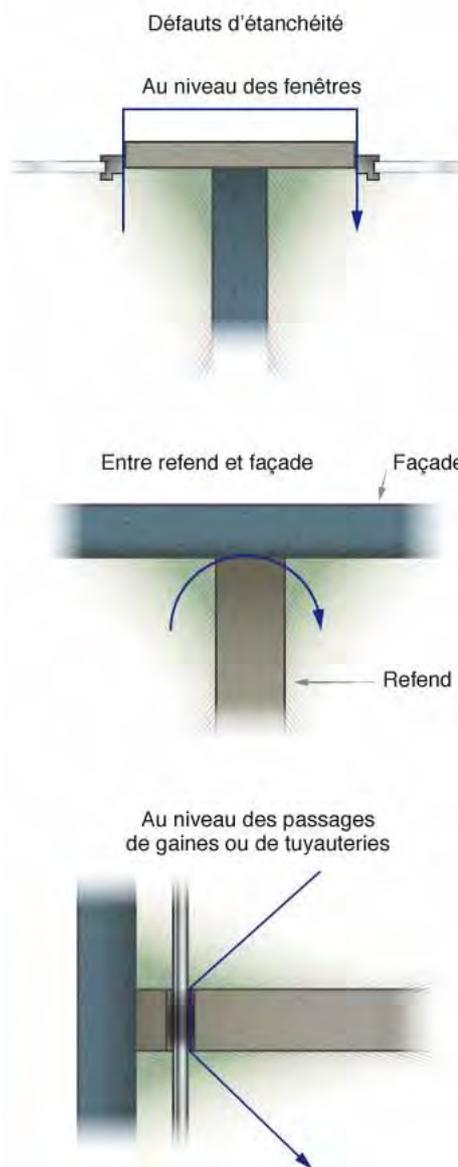
Quelques points clés :

- L'étanchéité à l'air réduit tout autant les déperditions acoustiques que thermiques.

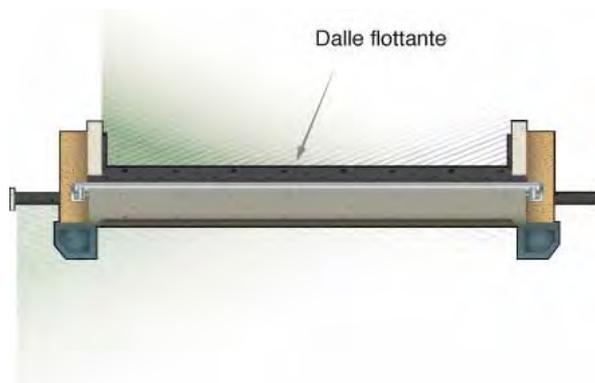
Les joints



Les fissures



- L'usage d'une dalle flottante améliore l'isolement acoustique aux bruits d'impact et peut contribuer à réduire les ponts thermiques et à augmenter l'inertie thermique dans la mesure où l'on utilise un isolant thermo-acoustique.





En conclusion de ces chapitres techniques, il est bon de souligner la complémentarité et l'apparente convergence des « bonnes solutions » constructives, thermiquement et acoustiquement efficaces.

Cela serait trop simple, cependant. **Les bonnes solutions thermiques n'améliorent pas forcément l'acoustique.** Il arrive fréquemment que ce soit le contraire, par exemple :

- Une isolation trop rigide, appliquée sur les parois verticales, comparable aux cloisons légères et rigides, peut amplifier la transmission du son, non seulement à travers la paroi elle-même, mais également à travers les transmissions latérales.
- Un doublage acoustique placé à l'intérieur va limiter la mobilisation de l'inertie thermique de la paroi doublée.
- Un matériau poreux, utilisé pour ses propriétés d'absorption acoustique, par exemple en faux plafond, pourra, s'il est trop épais et si la lame d'air n'est pas suffisamment ventilée, provoquer des condensations.

2.9 - Quelques exemples d'architectures maîtrisant la qualité acoustique du bâti

2.9.1 - Immeuble de bureaux

Labège (31670)

Maître d'œuvre : Philippe Vigneu (Vigneu et Zilio)

Maître d'ouvrage 6ENERGY+ (Gamba Acoustique)

Livraison : 2009

Il s'agit là d'une réalisation exemplaire qui met en œuvre des solutions techniques connues. Ce bâtiment (R + 1) de 1 000 m² à énergie positive, énergie d'usage comprise, repose sur des principes simples : enveloppe béton pour privilégier l'inertie thermique, ventilation nocturne naturelle et façade orientée au sud pour l'éclairage naturel et le captage des **gains solaires**.

Des solutions techniques éprouvées ont été mises en œuvre, comme une pompe à chaleur sur forage, une **ventilation double flux** à haut débit, des luminaires performants et « intelligents » ainsi que 355 m² de capteurs photovoltaïques (faisant également office de brise-soleil) qui couvrent largement la totalité du besoin en électricité, soit 63 500 kWh/an produits, contre 37 500 kWh/an consommés.

La conception du bâtiment exploite intentionnellement les propriétés du béton. Ce matériau est mis en œuvre pour réaliser la structure du rez-de-chaussée. Le remplissage des murs et de la toiture utilise des éléments préfabriqués en béton cellulaire avec isolation répartie.

Parallèlement, des chapes sur plancher chauffant-rafraîchissant ont été coulées à l'intérieur. Les planchers sont corrélés et les plafonds en béton sont laissés apparents pour favoriser l'échange thermique entre l'air ambiant et la masse de béton.



POUR LE CONFORT D'ÉTÉ

L'exploitation de l'inertie est rendue possible par une ventilation nocturne naturelle et traversante. La masse de béton, rafraîchie la nuit, restitue le jour la fraîcheur accumulée. Dans le cas où le simple stockage de la fraîcheur nocturne ne suffit plus à assurer le confort thermique, l'inertie des planchers en béton est activée par une circulation d'eau provenant de 800 m de forages géothermiques. Une pompe à chaleur pourrait également venir

en complément. Les occupants ne subissent ainsi aucun inconfort, même en cas de forte chaleur.

POUR LE CONFORT D'HIVER

L'inertie des dalles est mobilisée pour accumuler la chaleur gratuite des rayons du soleil, de la présence humaine ou des ordinateurs et la restituer par la suite. Le complément de chauffage est fourni par le plancher chauffant connecté à la pompe à chaleur sur géothermie.

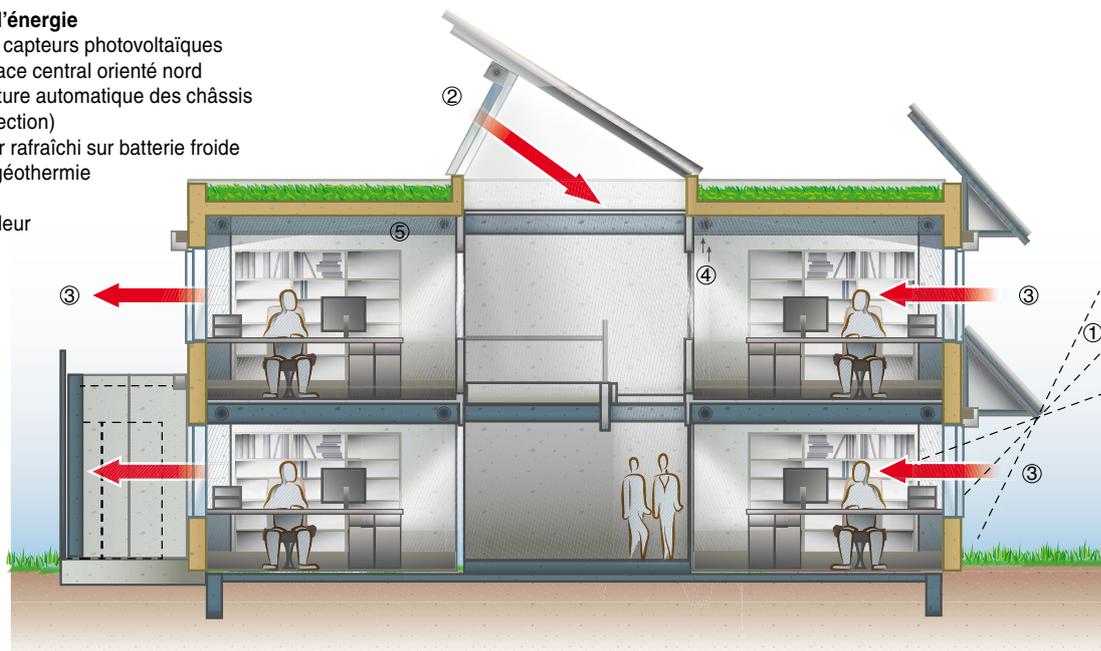
UNE ACOUSTIQUE OPTIMALE

La **correction acoustique** des bureaux a nécessité la pose de **baffles suspendus** au plafond. Ils absorbent la réverbération des sons sur les surfaces béton sans couper l'exploitation de l'inertie.



Confort d'été - économie d'énergie

1. Protection façade sud par capteurs photovoltaïques
2. Éclairage naturel de l'espace central orienté nord
3. Ventilation de nuit : ouverture automatique des châssis (maille métallique de protection)
4. Ventilation double flux : air rafraîchi sur batterie froide sur pompe à chaleur sur géothermie
5. Plancher rafraîchissant + inertie sur pompe à chaleur



Dans un bâtiment de travail, les ambiances sonores sont jugées de qualité lorsque les occupants peuvent percevoir facilement les signaux acoustiques qui leur sont utiles et qu'ils ne sont pas dérangés par les autres bruits. En dernière analyse, ceci suppose une maîtrise des isolements acoustiques (aux bruits aériens et aux bruits d'impact) entre locaux, ainsi qu'une maîtrise de la réverbération de chaque pièce.

Les objectifs à atteindre pour chacun des paramètres dépendent des activités exercées dans les locaux concernés. Dans ce projet, les choix thermiques et de qualité de l'air intérieur compliquent la conception des solutions acoustiques, d'autant que les objectifs visés pour la qualité des ambiances sonores sont également ambitieux. Ces difficultés sont de deux ordres :

- la ventilation double flux double le nombre de gaines, le débit d'air brassé à faible vitesse augmente les diamètres des conduits et, au final, l'interphonie entre locaux augmente ; cette situation nécessite l'interposition de silencieux. Ces équipements demandent aussi un entretien régulier car ils doivent être nettoyés ;
- pour que l'inertie thermique des dalles soit pleinement sollicitée, celles-ci ne doivent pas être revêtues, ni en surface, ni en sous-face de matériaux isolants ; en surface, l'inertie sera donc préservée par un revêtement à base de carrelage, ou même en laissant les sols béton nus.

En revanche, laisser la sous-face libre interdit l'usage du traditionnel faux plafond suspendu, qui confère

aux locaux une ambiance « feutrée » plus appréciable encore quand il s'agit de bureaux collectifs et non individuels. Accessoirement, le faux plafond traditionnel contribue également à l'isolement entre pièces, de même qu'il fait souvent office de « cache-misère », en dissimulant gaines, chemins de câbles et raccordements. Dans ce projet, à l'inverse, les concepteurs se sont orientés vers un design dépouillé et un traitement de la réverbération par des baffles suspendus verticalement.

2.9.2 - Salle de musique

Nancy (54000)

Maître d'œuvre : Périphériques Architectes, Anne-Françoise Jumeau, Emmanuelle Marin et David Trottin

Livraison : 2007

Le maître d'œuvre présente sa réalisation en ces termes : « *Le parti urbain de notre projet de Centre régional des musiques actuelles consiste à renforcer le plan général d'aménagement vert de ce vaste quartier de Nancy en pleine mutation. C'est dans cette dynamique que l'esthétique de ce nouveau bâtiment incarne l'aspect novateur du lieu en le renforçant par la diffusion, la production et la fabrication d'une culture musicale actuelle.* »

Le principe est de « creuser » ce volume urbain de facture architecturale puissante et compacte qui contient le cœur même du programme – les salles de concerts et l'ensemble du programme fonctionnel (les studios, bureaux, loges, etc.) – et d'y percer





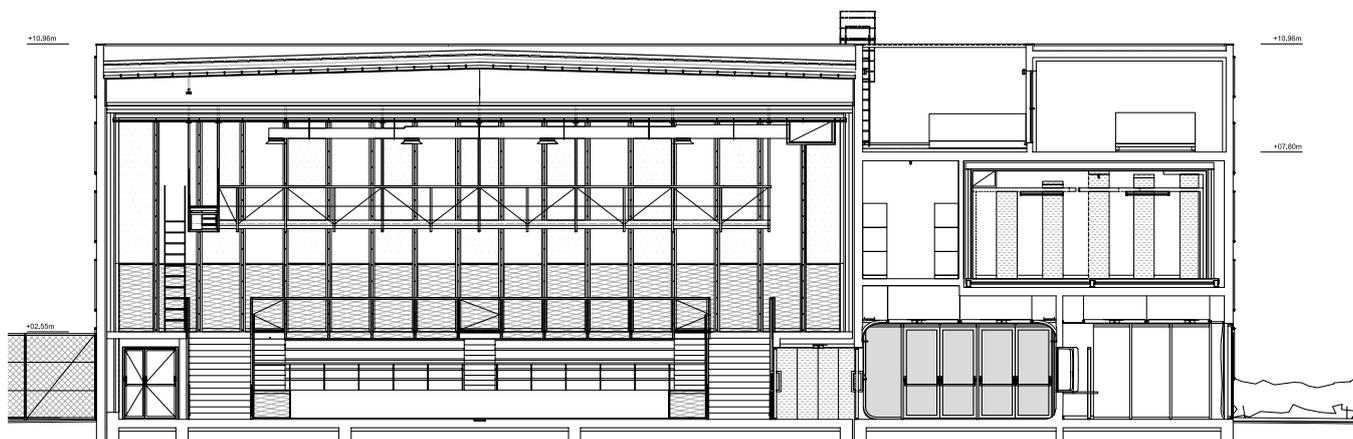
une « rue intérieure » horizontale et de plain-pied (large facilité d'accès pour le public et les matériels) d'un rouge éclatant. Véritable **fil rouge** convivial et fonctionnel de l'équipement, cette rue intérieure révèle et dessert toute l'intériorité du projet.

Le bâtiment est donc un « solide » de béton, coloré de rouge par le métal des banches qui auront servi à le couler. La texture de l'ensemble des façades est animée par des engravures contenant des lampes verticales encastrées qui animeront différemment le bâtiment le jour et bien sûr la nuit, faisant de lui une véritable lanterne magique dans la ville et marquant ainsi son identité de centre musical.

UNE ACOUSTIQUE MAÎTRISÉE

Ici, la structure ne se résume pas, comme dans beaucoup d'équipements, à un simple ensemble de poteaux et de poutres avec des façades légères. Bien au contraire, les éléments majeurs sont **des parois et des planchers massifs**, de façon à exploiter pleinement la capacité du béton à atténuer, par sa masse, les ondes sonores.

Cet affaiblissement acoustique important des éléments structurels participe à la gestion de cette salle, les concerts ne devant en rien gêner le voisinage. De plus, pour atteindre le confort acoustique souhaité, les éléments de structure en contact



direct avec les vibrations sonores émises dans les locaux ont été désolidarisés. À titre d'exemple, les studios d'enregistrement sont posés sur des dalles flottantes, grâce à l'interposition de **boîtes à ressorts** entre la dalle de structure et le plancher en béton des studios (plots antivibratoires). Ces appareils isolent complètement la structure interne étanche, empêchant la transmission directe des ondes sonores (principe de la double paroi sans liaisons).



C'est une solution standard en acoustique industrielle: utiliser des plots de découplage ou plots antivibratoires. Ils sont soit de type élastique (en caoutchouc) soit à ressorts (métalliques). Ces plots sont testés pour une dureté et une gamme de fréquences de résonance.

Conclusion

Comme nous l'avons vu à travers de nombreux exemples, les performances thermiques et acoustiques des bâtiments sont des données essentielles pour le confort des utilisateurs.

Il est important d'intégrer ces préoccupations dès la conception des bâtiments en respectant une règle d'or : le confort thermique et le confort acoustique doivent être étudiés en même temps. En effet, ceci permet d'éviter un certain nombre d'interactions malheureuses et de développer des synergies positives.

La consultation de spécialistes est donc recommandée très en amont du projet. Elle facilite le choix des meilleures solutions techniques à mettre en œuvre.

Les « systèmes constructifs béton + isolant » ont l'avantage d'offrir des solutions conformes à la RT2012, mais également à la réglementation acoustique en vigueur. En outre, pour les basses fréquences, le BPE assure un meilleur confort que des solutions légères, telles que le bois.

Glossaire

ANRU – Depuis 2004, l'Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine met en œuvre, avec ses partenaires (le SG-CIV, la DHUP, l'UESL – Action logement, l'USH, la Caisse des Dépôts...) des programmes globaux et pluriannuels d'intervention, afin de transformer ces quartiers stigmatisés en quartiers ordinaires intégrés à la ville. À travers le Programme National de Rénovation Urbaine et le Programme Quartiers Anciens, l'ANRU intervient sur les logements, la voirie et les espaces publics, les établissements scolaires, les commerces, les crèches, les centres multi-activités.

Baffles – Éléments absorbants en laine de roche ou en mélamine suspendus au plafond pour diminuer le temps de réverbération et abaisser le niveau sonore des locaux traités.

Bbio_{max} – Cette exigence fixe une limite du besoin cumulé en énergie pour les composantes dépendant de la conception du bâti : chauffage, refroidissement et éclairage artificiel. Elle impose ainsi une optimisation du bâti indépendamment des systèmes énergétiques mis en œuvre.

Le Bbio_{max} est modulé en fonction de la typologie du bâtiment, de sa localisation géographique et de son altitude. Pour les maisons individuelles ou accolées, une modulation permet en outre de tenir compte de la surface, afin de ne pas pénaliser les petites constructions.

Boîtes à ressorts – Systèmes antivibratoires. Il existe des amortisseurs de vibrations élastiques, équipés d'un matériau souple, appropriés pour amortir de faibles vibrations, ou pour des matériels légers ou moyennement lourds.

Il existe également des amortisseurs hydrauliques ou à ressort pour des mécanismes plus lourds.

Bruit rose – Bruit normalisé dont l'énergie est constante par bande d'octave ou 1/3 d'octave. Utilisé en acoustique du bâtiment, il sert par exemple de référence lorsque l'on mesure un isolement acoustique entre locaux, ou vis-à-vis de l'espace extérieur lorsque la nuisance est générée par le trafic aérien.

Bruit route – Un bruit route, ou bruit routier, est un bruit normalisé. Il est une référence pour le bruit des trafics routiers et ferroviaires. Son spectre est enrichi en basses fréquences et appauvri dans les aigus par rapport à un bruit rose.

Capacité thermique – La capacité thermique (ou capacité calorifique) d'un corps est une grandeur permettant de quantifier la possibilité qu'a ce corps d'absorber ou restituer de l'énergie par échange thermique au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie.

Cep_{max} – Cette exigence porte sur les consommations énergétiques conventionnelles en énergie primaire sur cinq usages (chauffage, refroidissement, éclairage, production d'eau chaude sanitaire, auxiliaires tels que pompes et ventilateurs), déduction faite de la production d'électricité à demeure.

Comme pour le Bbio_{max}, des modulations sont introduites sur le Cep_{max} selon la localisation géographique et l'altitude, afin de prendre en compte les disparités géographiques et climatiques du territoire.

En outre le Cep_{max} est modulé selon les émissions de gaz à effet de serre (GES), afin d'encourager l'utilisation des énergies les moins émettrices de CO₂, à savoir le bois-énergie et les réseaux de chaleur ou de froid utilisant une part prépondérante d'énergies renouvelables (EnR). L'augmentation de la valeur du Cep_{max} peut alors atteindre au maximum 30 %.

Une modulation relative à la surface moyenne des logements est introduite, pour prendre en compte les postes de consommation d'énergie qui ne sont pas liés à la surface des locaux (comme l'eau chaude sanitaire); l'expression des exigences par m² de surface induisant une contrainte plus forte sur les logements de petite surface, ce paramètre permet de ne pas les pénaliser.

Enfin, le Cep_{max} est modulé selon le type de bâtiment et selon son usage (locaux d'enseignement, bureaux...).

Chaudière à micro cogénération – Le principe de la cogénération consiste à produire en même

temps et dans la même installation, à partir de la même énergie combustible, de la chaleur (énergie thermique) et de l'énergie électrique.

Compacité – En architecture, la compacité d'un bâtiment représente le rapport entre l'aire de son enveloppe et son volume.

Correction acoustique – La correction acoustique correspond à la mise en œuvre de matériaux absorbants (panneaux acoustiques, mousses de mélamine, projection acoustique etc.) visant à limiter la réverbération des sons dans une pièce donnée.

Dalle flottante – Elle est plus épaisse qu'une chape et elle est séparée de la dalle support par un matelas « souple ». La dalle flottante, désolidarisée du plancher et des murs, amortit les bruits dus aux chocs.

Décibel – En mesure du bruit, le décibel, souvent abrégé dB, est une application à l'acoustique du décibel, qui exprime le rapport de l'intensité acoustique ou de la pression acoustique à une valeur de référence (0 dB SPL) qui correspond à un son imperceptible.

Le dB(A) est utilisé pour mesurer les bruits environnementaux.

Il s'agit d'un décibel pondéré A qui constitue une unité du niveau de pression acoustique.

Le décibel de pression acoustique repère le niveau sonore quelle que soit sa fréquence. Un chuintement aigu a le même niveau qu'un ronflement grave, s'ils ont la même pression acoustique. Mais l'oreille et le cerveau humain ne sont pas également sensibles dans toutes les hauteurs tonales ; les auditeurs ressentiront le chuintement aigu comme beaucoup plus sonore que le ronflement de même intensité acoustique sur le plan physique.

Pour obtenir un résultat qui reflète mieux la manière dont l'oreille humaine entendrait et interpréterait le son, les sonomètres appliquent aux sons la pondération « A » et donnent une mesure en dB A.

Des lois et règlements exigent que les mesures de bruit soient effectuées avec la pondération « A ».

Doubles murs – Ces murs du type III sont des murs dans lesquels la paroi extérieure en maçonnerie, non protégée par un revêtement étanche, est doublée par une seconde paroi séparée de la première par une lame d'air continue à la base de laquelle sont prévus des dispositifs de collecte et d'évacuation vers l'extérieur des eaux d'infiltration éventuelles.

Murs doubles comportant un dispositif destiné à recueillir les infiltrations et à les rejeter à l'extérieur (c'est un type amélioré).

Eau chaude thermodynamique – Le ballon d'eau chaude thermodynamique intègre dans le même produit un ballon d'eau chaude et une pompe à chaleur air/eau. C'est une solution de chauffage sanitaire économique et performante, car elle utilise l'air du local pour chauffer l'eau, en restituant dans l'eau et au moyen d'un échangeur, l'énergie des calories de l'air ambiant.

Échelle logarithmique – Une échelle logarithmique est un système de graduation particulièrement adapté pour rendre compte des ordres de grandeur dans les applications. De plus elle permet de rendre accessible une large gamme de valeurs de même signe.

Énergie solaire thermique – L'énergie solaire thermique désigne l'énergie récupérée à partir de la lumière du soleil par des capteurs solaires thermiques vitrés pour assurer le chauffage direct de l'eau et des locaux. La chaleur concentrée par les panneaux est transférée à un fluide caloporteur.

Énergies fossiles – L'énergie fossile désigne l'énergie que l'on produit à partir de roches issues de la fossilisation des êtres vivants : pétrole, gaz naturel et houille. Elles sont présentes en quantité limitée et non renouvelable. Leur combustion entraîne des gaz à effet de serre.

Énergies renouvelables – Les énergies renouvelables (EnR en abrégé) sont des formes d'énergies dont la consommation ne diminue pas la ressource à l'échelle humaine. L'expression énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable ».

Gains solaires – Les apports solaires ou gains solaires représentent l'énergie entrante par l'ensoleillement direct à travers les vitrages. Ils se font généralement par transmission surfacique des parois chaudes en contact avec l'extérieur.

Gaz à effet de serre (GES) – Les gaz à effet de serre (GES) sont des composants gazeux qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre contribuant à l'effet de serre.

L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre est l'un des facteurs à l'origine du récent réchauffement climatique.

Hertz – Unité de fréquence permettant de mesurer le nombre de fois où un événement survient par seconde et dont le symbole est Hz.

Indice d'affaiblissement acoustique – C'est la grandeur qui caractérise l'aptitude d'un matériau à atténuer la transmission du son (caractéristique intrinsèque d'ouvrage tel qu'une cloison par exemple).

On définit l'indice d'affaiblissement acoustique par la formule suivante :

$$R = L1 - L2 + 10 \log (S/A)$$

où :

- L1 est le niveau de pression acoustique à l'émission ;
- L2 est le niveau de pression acoustique à la réception ;
- S est la surface de matériau testée en m² ;
- A est l'aire d'absorption présente dans le local de réception en m².

Il est mesuré en laboratoire en l'absence de toutes transmissions latérales. On l'exprime en dB(A) par rapport à un bruit rose ou routier (cas des indices Rose et Rroute).

On définit également un indice européen Rw dont la valeur est obtenue par comparaison de la courbe de R en fonction de la fréquence avec une courbe de référence standard. La valeur à 500 Hz de cette courbe qui se rapproche le mieux de la courbe de R en fonction de la fréquence est par définition l'indice Rw.

Inertie thermique – L'inertie thermique est la capacité physique d'un matériau à conserver sa température.

L'inertie thermique d'un bâtiment est recherchée afin de minimiser les apports thermiques à lui apporter pour maintenir une température constante. L'inertie thermique est importante pour assurer une ambiance climatique confortable pour ses occupants.

Un bâtiment à forte inertie thermique équilibrera sa température en accumulant le jour, la chaleur qu'il restituera la nuit pour assurer une température moyenne.

Les matériaux à forte inertie thermique sont utilisés pour accumuler la chaleur ou la fraîcheur (radiateur à accumulation, radiateur à inertie thermique, murs et planchers en béton, etc.).

Isolation thermique par l'extérieur (ITE) – Procédé d'isolation thermique qui positionne l'isolant coté extérieur à la structure porteuse comme un « manteau thermique » enveloppant le bâtiment. Il existe en effet des procédés collés à enduits minces ou épais ainsi que des procédés fixés mécaniquement comme les isolants sous bardages et les vêtements. L'isolation thermique extérieure présente l'avantage d'éliminer la plupart des ponts thermiques à l'exception de ceux relatifs aux balcons. Elle renforce également l'inertie thermique intérieure du bâtiment. En rénovation thermique, elle peut être réalisée en présence des occupants du bâtiment.

Isolation thermique par l'intérieur (ITI) – Procédé d'isolation thermique qui positionne l'isolant coté intérieur à la structure porteuse. Le plus souvent, il s'agit d'un complexe d'isolation constitué d'un isolant et d'une plaque de plâtre. Dans d'autres cas, le parement est constitué par une planelle ou paroi en béton. Le complexe isolant est fixé sous formes de plaques par des plots de colle. La jonction entre les plaques s'effectue par une bande de jointoiment et un enduit de lissage. L'avantage de ce procédé d'isolation est sa rapidité de mise en œuvre pour fixer l'isolant et la plaque de plâtre qui sert de parement.

Son inconvénient majeur est qu'il ne résout pas les problèmes de ponts thermiques au droit des refends, des planchers et des balcons.

Isolement acoustique – On définit l'isolement acoustique brut par la formule :

$$Db = L1 - L2$$

où :

- L1 est le niveau de pression acoustique à l'émission
- L2 est le niveau de pression acoustique à la réception

Il s'agit donc de la différence arithmétique entre le niveau L1 dans le local d'émission et le niveau L2 dans le local réception, tous deux exprimés en dB ou dB(A). Il se mesure sur site.

Isolement acoustique standardisé pondéré – S'exprime en dB, il permet de caractériser par une seule valeur l'isolement acoustique en réponse à un bruit de spectre donné. Il est mesuré in situ entre deux locaux (D_{nt,A}) ou entre l'extérieur du bâtiment

et un local ($D_{nT,A,tr}$). Il dépend de l'indice d'affaiblissement acoustique $R_w + C$ de la paroi séparative, des transmissions latérales, de la surface de la paroi séparative, du volume du local réception et de la durée de réverbération du local.

Loi de masse – Elle exprime la perte de transmission du son dans la paroi ou le matériau. Les matières lourdes empêchent le passage d'une plus grande proportion de bruit que les matières légères. Pour un matériau étanche, la perte de transmission est augmentée de 6 dB chaque fois que la masse est doublée.

Loi masse-ressort-masse – En combinant certains matériaux, on peut appliquer le principe dit « masse-ressort-masse ». Deux masses sont séparées par un ressort, lequel peut être de l'air ou un matériau absorbant. Lorsque le bruit heurte la première masse, celle-ci se met à osciller. Le ressort entre les deux couches intercepte ces vibrations et fait office d'amortisseur. Le bruit est ensuite considérablement atténué lors de sa transmission à la deuxième masse. L'épaisseur et la qualité amortissante du ressort constituent les facteurs essentiels pour déterminer le niveau d'absorption des vibrations.

Ce principe consiste à utiliser des parois doubles, telles que plaques de plâtre, séparées par de l'air rempli par une laine minérale, qui absorbe et dissipe l'énergie. En rénovation, cette solution permet un traitement efficace sans surcharger les structures.

Niveau de bruit de chocs standardisés – C'est le niveau de pression acoustique mesuré sous un plancher soumis aux sollicitations d'une machine à chocs normalisée. Il peut être mesuré par bandes de fréquences ou directement en dB(A).

Plus le niveau mesuré est faible, meilleur est le comportement du plancher. Il se mesure en laboratoire ou sur site.

Octave – La sensation de l'oreille en fréquence n'est pas linéaire. Plus elle est élevée, plus il faut une grande variation de cette fréquence pour que l'impression de variation reste constante. Des valeurs de fréquences sont normalisées pour exprimer cette sensation : 31,5 / 63 / 125 / 250 / 500 / 1000 / 2000 / 4000 / 8000. Nous parlons ici d'octave, comme les musiciens. L'octave correspond à la multiplication par 2 de la fréquence. L'origine du mot octave est qu'il est le 1/8 de la bande des fréquences émises par les instruments de musique et audibles.

Pare-vapeur ou frein-vapeur – Matériau rigide ou le plus souvent souple placé côté intérieur (chaud) d'un mur en ossature bois, généralement derrière la plaque de parement et destiné à limiter la transmission de vapeur d'eau. Il contribue également à assurer l'étanchéité à l'air.

Parois déperditives – Les parois déperditives à prendre en compte pour les calculs sont les parois opaques, vitrées ou translucides séparant le local chauffé du logement :

- de l'extérieur
- du sol
- des locaux non chauffés.

Ne sont pas pris en compte pour le calcul des déperditions thermiques :

- les parois donnant sur d'autres locaux chauffés ou considérés comme tel (chauffés à plus de 12 °C en période d'occupation)
- les parois donnant sur des circulations communes intérieures considérées comme faisant partie du volume non chauffé du bâtiment lorsque la totalité de ces parois sont isolées
- les vitrines.

Perméabilité à l'air – La perméabilité à l'air d'une construction caractérise la sensibilité du bâtiment vis-à-vis des écoulements aérauliques parasites causés par les défauts de son enveloppe ou plus simplement tout défaut d'étanchéité non lié à un système de ventilation spécifique. Elle se quantifie par la valeur du débit de fuite traversant l'enveloppe sous un écart de pression donné.

Plancher chauffant-rafraîchissant – Un plancher chauffant-rafraîchissant est un système de chauffage et de climatisation de l'habitat qui présente l'intérêt d'utiliser une pompe à chaleur réversible pour produire indifféremment du chaud en hiver et du frais en été.

Pompe à chaleur – La pompe à chaleur (parfois désignée Pac) est un appareil qui utilise un dispositif thermodynamique, qui permet ainsi de transférer de la chaleur provenant d'un milieu froid, vers un lieu à chauffer. Autrement, c'est « le contraire » d'un réfrigérateur.

Principe et fonctionnement de la pompe à chaleur : La chaleur est le plus généralement captée dans l'air (aérothermie), ou dans le sol (géothermie). Le système de la pompe à chaleur est également appelé cycle frigorifique, technique utilisée dans les climatiseurs ou encore les réfrigérateurs. La pompe à chaleur fonctionne sur un principe de transfert

d'énergie thermique, à l'aide d'un changement d'état du fluide. Pour cela, un fluide frigorigène est installé dans la pompe à chaleur. Ce dernier, qui circule dans les circuits, permet une bonne régulation. Il existe différents systèmes de pompe à chaleur :

- la pompe à chaleur géothermique qui utilise l'énergie du sol pour chauffer la pièce ;
- la pompe à chaleur à air/air qui utilise l'énergie de l'air ;
- la pompe à chaleur au gaz naturel ;
- il existe également des pompes à chaleur réversibles qui permettent indifféremment de chauffer ou de refroidir un espace selon la température extérieure.

Pont thermique – Un pont thermique est une zone ponctuelle ou linéaire qui, dans l'enveloppe d'un bâtiment, présente une variation de résistance thermique. Il s'agit d'un point de la construction où la barrière isolante est rompue. Un pont thermique est donc créé si :

- il y a changement de la géométrie de l'enveloppe,
- il y a changement de matériaux et ou de résistance thermique.

PSEE – Polystyrène expansé élastifié – Les doublages isolants traditionnels à base de polystyrène expansé (PSE) ou de polyuréthane peuvent aller jusqu'à amplifier les bruits dans un local. Un désagrément que la réglementation interdit. Mais les fabricants d'isolants alvéolaires ont réagi. Notamment en transformant le PSE en polystyrène expansé élastifié, le PSEE. L'opération d'élastification se réalise après la fabrication du PSE traditionnel par écrasement des plaques sous presse. « En comprimant le matériau, sa rigidité diminue, mais ses qualités acoustiques s'améliorent sous l'effet de la relaxation des contraintes ».

Refend – Un mur de refend n'est rien d'autre qu'un mur porteur ne faisant pas partie des murs de façade. Il est généralement placé selon l'axe de la façade de l'édifice.

Lorsqu'il est transversal (ce qui est le plus souvent le cas), le mur de refend forme ce qu'on appelle le « contreventement » et renforce la structure de manière horizontale et verticale. En revanche, lorsqu'il est longitudinal, le mur de refend est alors destiné à aider les murs de façade à soutenir le poids des étages (poutres, plancher etc.).

Le positionnement des murs de refend régit la division en pièces d'un bâtiment. Les pièces en enfilade sont dues aux refends transversaux. Un mur de refend longitudinal donne lieu à deux enfilades (ce qu'on appelle le système du « corps-double »). Il arrive qu'un édifice comporte deux murs de refend longitudinaux, offrant alors un couloir, passage central à travers le bâtiment. Il s'agit alors simplement d'un corps-double avec couloir.

Résistance thermique – La résistance thermique (R), mesure la résistance qu'une épaisseur de matériau oppose au passage de la chaleur. Elle constitue en fait son pouvoir isolant qui est d'autant plus fort que le R est élevé.

Dans le domaine du bâtiment on peut trouver la définition de la résistance thermique d'un matériau (par exemple un isolant) intrinsèque, c'est-à-dire en ne tenant pas compte de la surface exposée. Elle est appelée résistance thermique surfacique, ou coefficient d'isolation thermique surfacique, exprimée en mètre carré-kelvin par watt.

Elle dépend du coefficient de conductivité thermique (λ) du matériau et de son épaisseur.

$$R = e/\lambda$$

où :

e est l'épaisseur en m

λ est la conductivité thermique en watt par mètre-kelvin ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

Rigidité à la flexion – La flexion est la déformation d'un objet qui se traduit par une courbure. Dans le cas d'une poutre, elle tend à rapprocher les deux extrémités de la poutre. Dans le cas d'une plaque, elle tend à rapprocher deux points diamétralement opposés sous l'action.

La rigidité est la capacité d'un corps solide à s'opposer à des déformations lorsqu'il est soumis à des sollicitations mécaniques. Elle dépend principalement de la géométrie de la pièce et des modules d'élasticité du matériau.

Rupteur de pont thermique – Un rupteur de pont thermique est un dispositif positionné en about de dalle qui permet d'avoir une isolation continue. Il est composé d'un isolant et il relie le mur extérieur au plancher grâce à des aciers de structure.

Le rupteur de pont thermique permet de freiner le flux thermique entre l'intérieur et l'extérieur. On constate que sans rupteur, la température à la

surface de la dalle est d'environ 10 °C, contre 15 °C avec un rupteur. Le rupteur permet donc de diminuer la différence de température entre la surface de la dalle et l'air ambiant. Cela permet d'offrir un meilleur confort à l'occupant et de résoudre les problèmes de condensation.

Silencieux acoustiques – Terme familier employé par les professionnels pour « atténuateur » ou « piège à sons ». Dispositif servant à atténuer l'amplitude, la puissance d'un son, d'un bruit.

Sous-couche résiliente – Sous-couche qui absorbe les vibrations

Surface habitable – Définition actuelle selon les 2^e et 3^e alinéas de l'article R. 111-2 du code de la construction et de l'habitation :

« La surface habitable d'un logement est la surface de plancher construite, après déduction des surfaces occupées par les murs, cloisons, marches et cages d'escaliers, gaines, embrasures de portes et de fenêtres; le volume habitable correspond au total des surfaces habitables ainsi définies multipliées par les hauteurs sous plafond.

Il n'est pas tenu compte de la superficie des combles non aménagés, caves, sous-sols, remises, garages, terrasses, loggias, balcons, séchoirs extérieurs au logement, vérandas, volumes vitrés prévus à l'article R. 111-10, locaux communs et autres dépendances des logements, ni des parties de locaux d'une hauteur inférieure à 1,80 mètre. »

Température opérative – La température opérative (t_0) ou température résultante sèche, est un indicateur simple du confort thermique, qui prend en compte l'effet de la convection et du rayonnement.

Tic – Température intérieure conventionnelle

– Des catégories de bâtiments dans lesquels il est possible d'assurer un bon niveau de confort en été sans avoir à recourir à un système actif de refroidissement sont définies et dépendent du type d'occupation et de la localisation (zone climatique, altitude, proximité de zones de bruit).

Pour ces bâtiments, la règle actuelle $Tic \leq Tic_{réf}$ est maintenue: la température la plus chaude atteinte dans les locaux (Tic), au cours d'une séquence de 5 jours très chauds d'été, ne doit pas excéder un plafond ($Tic_{réf}$).

Des travaux complémentaires sont engagés en vue de traiter de manière encore plus approfondie la question du confort d'été et de définir cette exigence en valeur absolue.

Toiture végétalisée – Le principe de la toiture végétale (aussi: toit vert ou toit végétalisé) existe depuis la préhistoire. Il consiste à recouvrir d'un substrat végétalisé un toit plat ou à faible pente (jusqu'à 35° et rarement plus).

C'est une caractéristique architecturale fréquente d'un bâtiment durable, ou de type HQE® (approche architecturale incluant les principes et critères du développement durable).

De nombreuses expériences conduites en Europe (depuis les années 1970 surtout en Allemagne, Pays-Bas, Suisse, pays scandinaves, et depuis peu en Belgique, France, etc.) ont montré que pour des objectifs esthétiques ou de durabilité, comme dans la perspective de restauration ou protection de la biodiversité et de l'environnement en milieu urbain, l'aménagement d'un « écotuit » se révélait intéressant.

Ventilation double flux – Ce système permet de limiter les pertes de chaleur inhérentes à la ventilation: il récupère la chaleur de l'air vicié extrait de la maison et l'utilise pour réchauffer l'air neuf filtré venant de l'extérieur. Un ventilateur pulse cet air neuf préchauffé dans les pièces principales par le biais de bouches d'insufflation.

Ventilation ou surventilation nocturne – Procédé d'augmentation du débit de ventilation la nuit afin de limiter les niveaux de température dans les locaux le jour. Un des premiers objectifs de la ventilation est d'assurer un débit hygiénique pour satisfaire les besoins en air neuf des occupants. Cependant il peut être intéressant dans un double but de confort thermique et de gestion énergétique optimisée d'aller au-delà de ces valeurs de débit hygiénique. Cela peut se faire la nuit si la température extérieure est suffisamment basse. C'est le concept de surventilation nocturne qui est généralement couplé avec l'inertie de la structure.

Vitrage feuilleté – Le verre feuilleté de son nom usuel ou verre laminé de son nom technique est constitué d'au moins deux feuilles de verre séparées par des films intercalaires généralement de nature plastique. Il est notamment utilisé pour les pare-brise des voitures.

Un texte réalisé avec la participation de François L'Huilier

Graphiques : David Lozach,
Crédits photographiques : H. Abbadie [11-12-22-23], L-Bertau [17-19],
W. Berré [15-16], L Boegly [37-38]. Tous droits réservés.

Édition novembre 2013

CIM *béton*

CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex • Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10
E-mail : centrinfo@cimbeton.net • internet : www.infociments.fr

