



Etude qualité de l'air intérieur

Extension du groupe scolaire Ivry Levassor

77 boulevard Masséna, 3 à 9 rue Emile Levassor; 51/53 avenue de la
porte d'Ivry 75013

Maître d'ouvrage : Ville de Paris



Réalisation de l'étude : Benjamin Rigault
Responsable suivi de projet : Maxence Mendez

Date : 26/03/2019

Sommaire

Contexte de l'étude	3
Contexte qualité de l'air	4
Principaux polluants	4
Les oxydes d'azotes NOx	4
Ozone	4
Particules fines	4
Le dioxyde de carbone	5
Composés Organiques Volatils	5
Formaldéhyde	5
Benzène	5
Radon	6
Réglementation en matière de qualité de l'air	6
Valeurs guides	6
Réglementation française	7
Autres	8
Descriptif du site	10
Dioxyde d'azote et Ozone	10
Particules fines PM2.5 et PM10	11
Descriptif des paramètres de simulation	13
Choix des matériaux de simulation	14
Matériaux de construction : Scénario réel	14
Matériaux de construction : variante conventionnelle	16
Âge des matériaux	18
Occupation	19
Fonctionnement du système de ventilation	19
Etanchéité des parois	20
Scénarios de simulation	20
Résultats de simulation	21
Dioxyde de carbone (CO2)	21
Composés Organiques Volatils Totaux (COVT)	22
Formaldéhyde	24
Conclusions	27
Récapitulatif	27
Recommandations	28
Annexes	30
Résultats Dioxyde de carbone (CO2)	30



Résultats Composés Organiques Volatils Totaux (COVT)	31
Résultats Formaldéhyde	32
Indice ICONE (Indice de CONfinement dans les Écoles)	32
Benzène et formaldéhyde dans certains ERP	33



I. Contexte de l'étude

L'étude présentée porte sur la prévision de la qualité de l'air du projet de bâtiment démonstrateur d'écoconstruction « La Petite Fabrique d'Ivry-Levassor » situé au 77 boulevard Masséna, 3 à 9 rue Emile Levassor; 51/53 avenue de la porte d'Ivry 75013.

Les simulations ont été réalisées sur la base des connaissances disponibles en phase d'exécution et ont pour objectif d'identifier les choix de conception et de ventilation pouvant avoir un impact notable sur la qualité de l'air intérieur.

Une des particularités du projet réside dans les matériaux choisis : des matériaux biosourcés ainsi que de réemploi ont été utilisés.

II. Contexte qualité de l'air

On peut retrouver une multitude de polluants au sein d'un bâtiment. Ces polluants peuvent provenir de l'extérieur ou être émis directement à l'intérieur par les matériaux, les occupants, les usages... Ils peuvent devenir nocifs pour la santé lorsque leurs niveaux deviennent trop élevés.

Les principaux polluants reconnus et surveillés au sein des bâtiments sont présentés dans le paragraphe suivant, avec leurs sources d'émissions potentielles et leurs effets notoires sur la santé.

Leur impact sur la santé a été étudié par des agences comme l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) ou l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) et des niveaux à partir desquels ils peuvent avoir des effets nocifs ont été établis. Les réglementations, labels et certifications se basent sur ces niveaux.

1. Principaux polluants

a. Les oxydes d'azotes NO_x

Les oxydes d'azote sont des composés gazeux et sont notamment produits par les moteurs à combustion et les centrales thermiques et constituent les polluants majeurs de l'atmosphère. La diminution de la fonction pulmonaire des habitants des grandes villes d'Europe et d'Amérique du Nord est corrélée avec les fortes concentrations en NO_x observées.

b. Ozone

L'ozone est un gaz essentiel dans la stratosphère et dont l'action est de nous protéger des rayons de soleil. Il est cependant toxique à respirer.

C'est un polluant dit secondaire car il résulte de la transformation, sous l'effet du rayonnement solaire, de polluants (NO₂, CO, COV) essentiellement produits en zone urbaine par les véhicules. D'un point de vue santé, ses trois principaux effets possibles sont: la toux, l'inconfort thoracique et la douleur à l'inspiration profonde.

c. Particules fines

Les effets des particules fines sont nombreux et dépendent essentiellement de leur taille et de leur composition chimique. Plus les particules sont petites et plus elles pourront pénétrer profondément dans le système respiratoire, pouvant même à terme se retrouver dans l'ensemble de l'organisme via la circulation sanguine pour les plus fines d'entre elles. Elles peuvent ainsi être à l'origine d'inflammations et de l'aggravation de l'état de santé des personnes atteintes de maladies cardiaques et pulmonaires.



On s'intéresse en général à deux classes de particules fines pour établir des résultats:

- les PM_{10} : désignent l'ensemble des particules dont le diamètre est inférieur à $10 \mu m$
- les $PM_{2,5}$: désignent l'ensemble des particules dont le diamètre est inférieur à $2,5 \mu m$

Les particules sont alors distribuées en nombre selon leur diamètre.

d. Le dioxyde de carbone

Émis par les êtres vivants, le dioxyde de carbone (CO_2) est un bon indicateur du renouvellement de l'air intérieur et donc de l'efficacité du système de ventilation. Il permet ainsi de caractériser la qualité de l'air intérieur dans son ensemble.

Une concentration élevée et sur une longue durée en CO_2 peut engendrer de multiples symptômes néfastes pour les occupants d'une pièce : manque de concentration, fatigue, irritation, maux de tête, etc.

e. Composés Organiques Volatils

Ces composés peuvent être d'origine naturelle ou anthropique et leurs effets sur la santé peuvent être différents en fonction de leur composition.

Ils correspondent à un ensemble de composés appartenant à différentes familles chimiques. Ils sont largement utilisés dans la fabrication de nombreux produits, matériaux d'aménagement et de décoration. Une de leurs caractéristiques est de s'évaporer plus ou moins rapidement à température ambiante. De plus, les COV sont plus concentrés à l'intérieur qu'à l'extérieur, compte-tenu de la multiplicité des sources intérieures. Leurs possibles effets sur la santé sont des irritations de la peau, des muqueuses et du système pulmonaire, des effets cancérogènes...

Les COV Totaux (COVT) correspondent à la mesure de tous ces COV.

f. Formaldéhyde

Le formaldéhyde est un Composé Organique Volatil de la famille des aldéhydes, présent sous forme gazeuse à température ambiante. Il s'agit de l'un des composés organiques les plus utilisés par l'industrie chimique du fait de sa grande polyvalence.

Il est principalement utilisé pour la fabrication de colles, de résines et de vernis présents dans la production de contreplaqué, de panneaux agglomérés de fibres ou de particules (mélaminés), de meubles ou d'autres produits du bois.

Il a été reconnu comme "substance cancérogène avérée pour l'homme" par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) en 2004. Il est également classé comme mutagène de catégorie 2 au niveau européen depuis 2014.

Dans le cas d'expositions aiguë et chronique (à des doses plus faibles que celles susceptibles d'induire des cancers à long terme), ce composé peut provoquer des irritations oculaires et respiratoires

g. Benzène

Le benzène est un hydrocarbure synthétique, appartenant à la famille des Composés Organiques Volatils, couramment utilisé comme solvant ou dans l'industrie, ainsi que comme précurseur d'autres composés de chimie organique.

Ce composé est connu pour sa forte toxicité et ses voies de pénétration dans l'organisme sont en premier lieu respiratoire puis cutanée. Les effets d'une exposition aiguë au benzène sont des céphalées, des nausées voire une excitation nerveuse pouvant être à l'origine de facteurs dépressifs. Les effets d'une exposition chronique sont plus importants avec de possibles atteintes cutanées ou de la moëlle osseuse voire des effets cancérigènes (leucémies) ou génotoxiques.

h. Radon

Le radon est un gaz incolore et inodore radioactif d'origine naturelle, issu de la désintégration de l'uranium et du radium présents naturellement dans le sol et les roches. Il est présent partout à la surface du sol mais provient surtout des sols granitiques et volcaniques.

Ce composé est classé cancérigène certain pour le poumon, le risque étant lié au temps d'exposition ainsi qu'à la concentration en radon dans l'air respiré. Il représente la deuxième cause de cancer du poumon après le tabac.

L'arrêté du 22 juillet 2004 relatif aux modalités de gestion du risque radon dans les lieux ouverts au public stipule que les propriétaires, voire les exploitants de ces établissements situés dans l'un des 31 départements jugés prioritaires doivent faire procéder à des mesures d'activité volumique de radon.

Cette obligation de surveillance est à renouveler tous les 10 ans ou chaque fois que sont réalisés des travaux modifiant la ventilation ou l'étanchéité du bâtiment. Les établissements concernés par ces mesures sont : les établissements d'enseignement, les établissements sanitaires et sociaux avec hébergement, les établissements thermaux et les établissements pénitentiaires.

Les mesures doivent être réalisées par des professionnels agréés et conformément aux normes en vigueur (arrêté du 22 juillet 2015).

2. Réglementation en matière de qualité de l'air

Les réglementations pour surveiller et améliorer la qualité de l'air sont internationales, européennes, nationales. Les textes internationaux et européens sont transposés dans la législation nationale, elle-même adaptée au contexte régional et local.

Dans les paragraphes suivants, les réglementations et informations concernant la qualité de l'air en France ont été résumés et seront utilisés comme référence dans la suite de cette étude.

a. Valeurs guides

Les Valeurs Guides en Air Intérieur (VGAI), établies par l'Anses, visent à établir des seuils de référence pour les polluants rencontrés en air intérieur et sont fondées exclusivement sur

des critères sanitaires.

Une VGAI est définie comme étant la concentration dans l'air d'une substance chimique en dessous de laquelle aucun effet sanitaire ou aucune nuisance susceptible d'impacter la santé, n'est attendu pour la population générale, en l'état des connaissances actuelles.

L'élaboration des VGAI repose essentiellement sur :

- 1) la description et l'analyse des effets sur la santé liés aux polluants via l'exposition à l'air. Il s'agit en fait de dresser le profil toxicologique de la substance
- 2) la synthèse des valeurs guides et des valeurs toxicologiques de référence (VTR) disponibles dans la littérature
- 3) la proposition de VGAI pouvant être construites selon les guides méthodologiques publiés par l'ANSES lorsque cela est jugé nécessaire

Ces valeurs sont indicatives et servent à appuyer les pouvoirs publics dans l'élaboration de valeurs opérationnelles permettant la mise en place de mesures de gestion.

Actuellement, une dizaine de polluants d'intérêt de l'air intérieur ont fait l'objet d'une expertise de l'Anses sur les VGAI.

Parmi celles-ci, seul le formaldéhyde et le benzène ont des VGAI réglementaires inscrites au code de l'environnement et publiées par le décret ministériel n°2011-1727.

Polluant	Valeur Guide pour l'Air Intérieur (pour une exposition de longue durée)	
Formaldéhyde	30 µg/m ³ (2015)	10 µg/m ³ (2023)
Benzène	5 µg/m ³ (2015)	2 µg/m ³ (2023)

VGAI réglementaires établis par le décret n°2011-1727

Ces deux polluants sont également surveillés pour les écoles par le décret n°2012-14 du 5 janvier 2012, qui établit des valeurs limites au-delà desquelles des investigations complémentaires doivent être menées afin d'identifier et de neutraliser les sources, dans le but de ramener les niveaux en dessous de celles-ci.

Elles sont de 100 µg/m³ pour le formaldéhyde et 10 µg/m³ pour le benzène.

b. Réglementation française

La réglementation française prévoit également par l'article R221-1 du Code de l'Environnement des valeurs permettant de définir les moyen de surveillance de la qualité de l'air ambiant pour différents polluants. Ces valeurs se basent sur les résultats émis par l'OMS ou l'ANSES.

Le décret définit notamment pour une liste de polluants:

- des Valeurs Limites (VL): correspondant à un niveau à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser, fixé sur la base des connaissances scientifiques afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble

- un Objectif de Qualité (OQ): correspondant à un niveau à atteindre à long terme et à maintenir, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble

Polluants	Valeurs limites	Objectifs de qualité
Dioxyde d'azote (NO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> - 40 µg/m³ en moyenne annuelle civile - 200 µg/m³ en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de dix-huit fois par année civile 	40 µg/m ³ en moyenne annuelle civile
Ozone (O ₃)	-	120 µg/m ³ pour le maximum journalier de la moyenne sur huit heures, pendant une année civile
PM ₁₀	<ul style="list-style-type: none"> - 40 µg/m³ en moyenne annuelle civile - 50 µg/m³ en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de trente-cinq fois par année civile 	30 µg/m ³ en moyenne annuelle civile
PM _{2.5}	25 µg/m ³ en moyenne annuelle civile	10 µg/m ³ en moyenne annuelle civile
Benzène	5 µg/m ³ en moyenne annuelle civile	2 µg/m ³ en moyenne annuelle civile

Valeurs limites et objectifs de qualité établis par l'article R221-1 du Code de l'Environnement

c. Autres

Pour les polluants pour lesquels une VGAI n'a pas directement été établis, les seuils retenus en général et qui seront utilisés comme référence dans cette étude sont les suivant:

Polluants	Valeurs limites	Source
Dioxyde de carbone (CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> - ne pas dépasser 1000 ppm - tolérance à 1300 ppm 	Règlement Sanitaire Départemental (RSD)
	<ul style="list-style-type: none"> - seuil optimal : 1000 ppm - seuil maximal : 1700 ppm 	Indice de confinement de l'air dans les écoles (ICONE)
Composés Organiques Volatils Totaux	300 µg/m ³	Commission - Hygiène de l'air intérieur de l'agence fédérale Allemande pour l'environnement

(COVT)	1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Etiquetage sanitaire français des matériaux
--------	-------------------------------	---

A noter que l'ANSES recommande de ne pas élaborer de Valeur Guide de qualité d'air intérieur (VGAI) pour le CO₂, que ce soit pour ses effets propres ou pour les effets du confinement sur la santé. Elle insiste sur le fait que la seule mesure du CO₂ ne peut être considérée comme l'unique indicateur de qualité sanitaire de l'air intérieur au vu des résultats de ces travaux qui montrent que :

- les données épidémiologiques disponibles ne permettent pas de construire de valeur seuil du CO₂ protégeant des effets du confinement sur la santé, sur la perception de confort ou sur les performances cognitives,
- dans l'air de logements, d'écoles et de bureaux en France, la probabilité de dépassement de valeurs cibles sanitaires de divers polluants chimiques (VGAI du formaldéhyde, ...) n'est pas nulle même à des concentrations de CO₂ réduites.

III. Descriptif du site

L'école se situe à proximité d'un boulevard comme le détaille la Figure III-1. La qualité de l'air est représentative d'un site urbain dense.

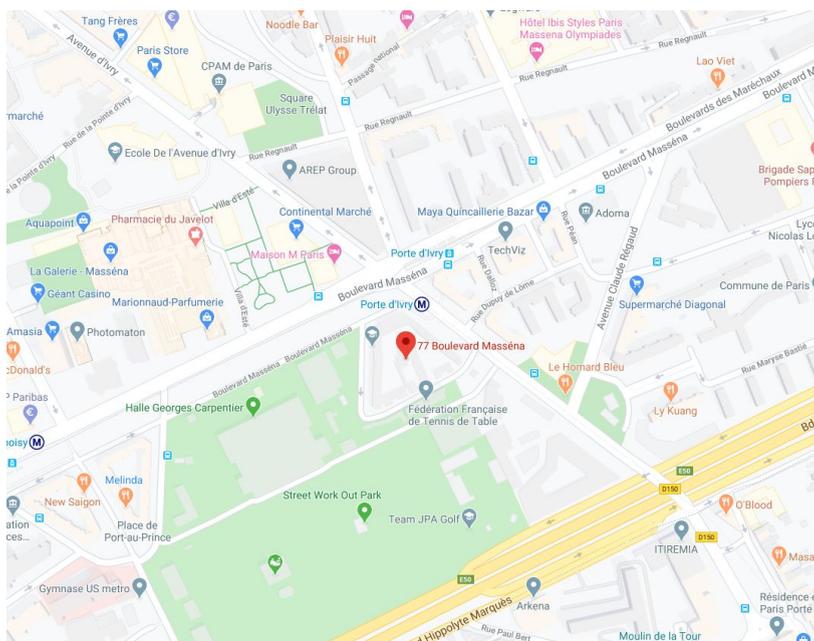


Figure III-1 : Localisation du site

Les données de pollution extérieure utilisées pour les simulations sont celles de l'année 2018. Elles proviennent d'interpolations faites à partir de mesures de stations de prélèvements situées à proximité du site. Celles-ci comprennent des mesures de concentration en ozone, dioxyde d'azote, particules fines $PM_{2,5}$ et PM_{10} sur un pas de temps horaire.

1. Dioxyde d'azote et Ozone

La concentration moyenne annuelle extérieure de dioxyde d'azote (NO_2) est de $27,1 \mu g/m^3$ (Figure III-2) et ne dépasse pas la valeur limite réglementaire en France de $40 \mu g/m^3$ (II-2-b). Pour ce qui est de la concentration moyenne annuelle extérieure d'ozone (O_3), elle est de $47,3 \mu g/m^3$ (Figure III-3). Cette concentration est bonne en comparaison à l'objectif qualité qui vise $120 \mu g/m^3$ (II-2-b). Ici, cet objectif serait principalement dépassé l'été, mais lorsque l'école est censée ne pas être occupée.

Concentration extérieure en NO₂

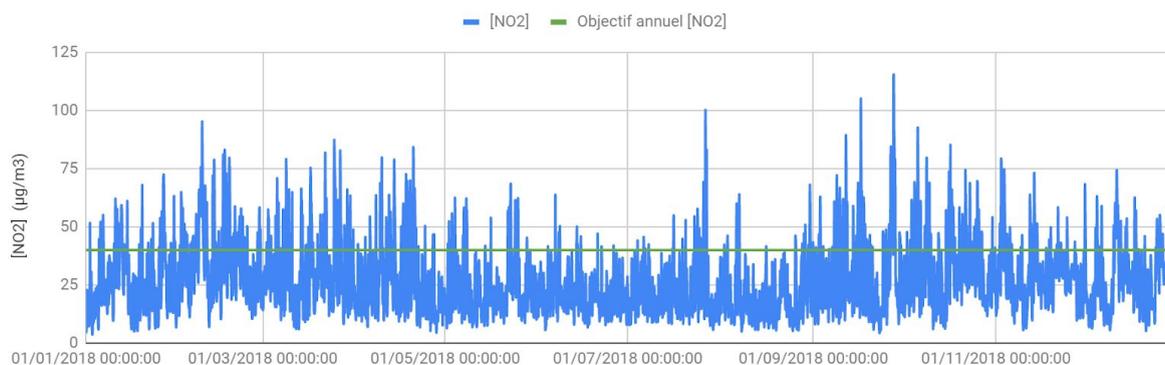


Figure III-2 : Concentration annuelle en NO₂ autour du site de construction (courbe bleue) et valeur limite réglementaire (courbe verte)

Concentration extérieure en O₃

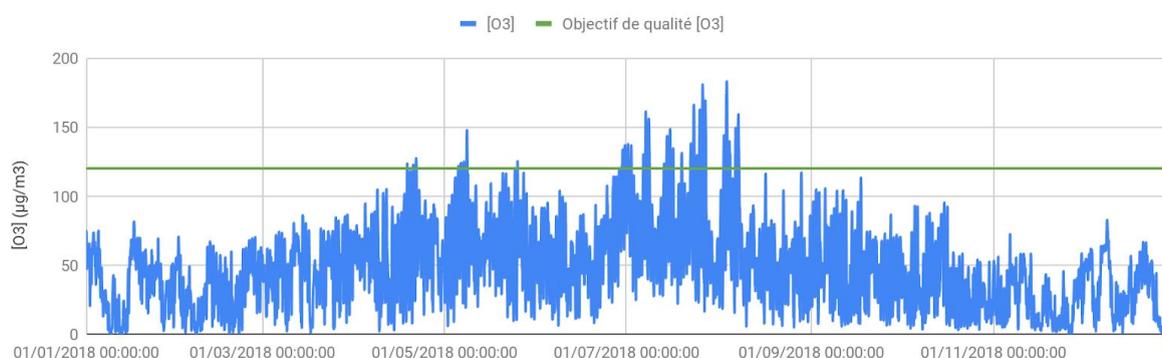


Figure III-3 : Concentration annuelle en O₃ autour du site de construction (courbe bleue) et objectif de qualité (courbe verte)

2. Particules fines PM_{2,5} et PM₁₀

Les concentrations moyennes annuelles extérieures en PM_{2,5} et PM₁₀ sont respectivement 4,3 et 20,6 µg/m³ (Figure III-4 et III-5).

Ces concentrations moyennes annuelle se situent donc en dessous des valeurs limites annuelles qui sont de 25 µg/m³ pour les PM_{2,5} et 40 µg/m³ pour les PM₁₀ (II-2-b).

Concentration extérieure en PM_{2,5}

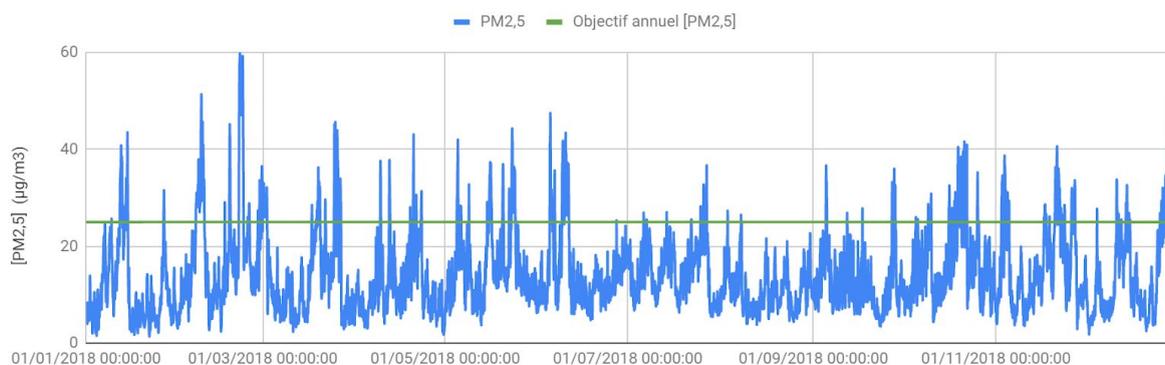


Figure III-4 : Concentration annuelle en PM_{2,5} autour du site de construction (courbe bleue) et valeur limite réglementaire (courbe verte)

Concentration extérieure en PM₁₀

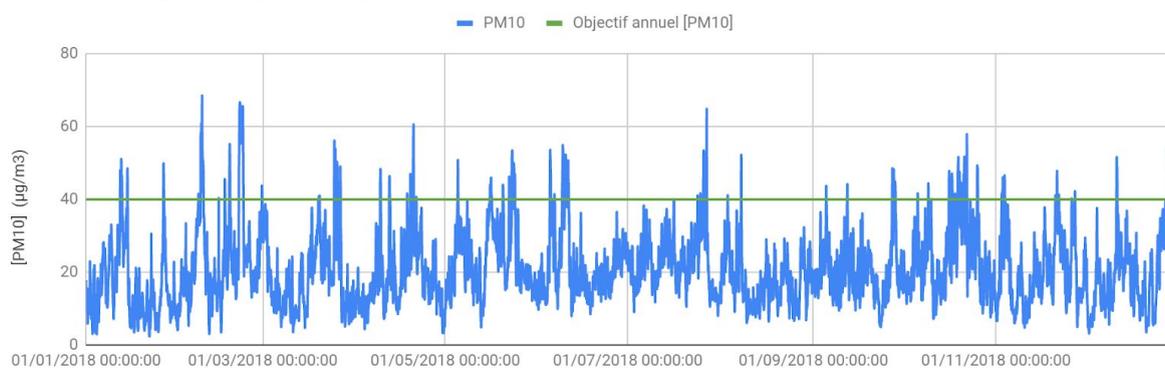


Figure III-5 : Concentration annuelle en PM₁₀ autour du site de construction (courbe bleue) et valeur limite réglementaire (courbe verte)

IV. Descriptif des paramètres de simulation

L'étude a été réalisée à l'aide du logiciel INDALO v3.16, développé par Octopus Lab, utilisant le moteur de calcul INCA-Indoor © et intégré à Autodesk Revit pour l'usage en BIM.



Une maquette simplifiée de l'extension du groupe scolaire Ivry Levassor a été réalisée pour l'étude (Figure IV-1).

Celle-ci comprend :

- une Bibliothèque Centre Documentaire répartie en deux pièces nord et sud
- un SAS desservant la bibliothèque
- un local de stockage
- une salle de classe au R+1
- une cage d'escalier desservant le R+1

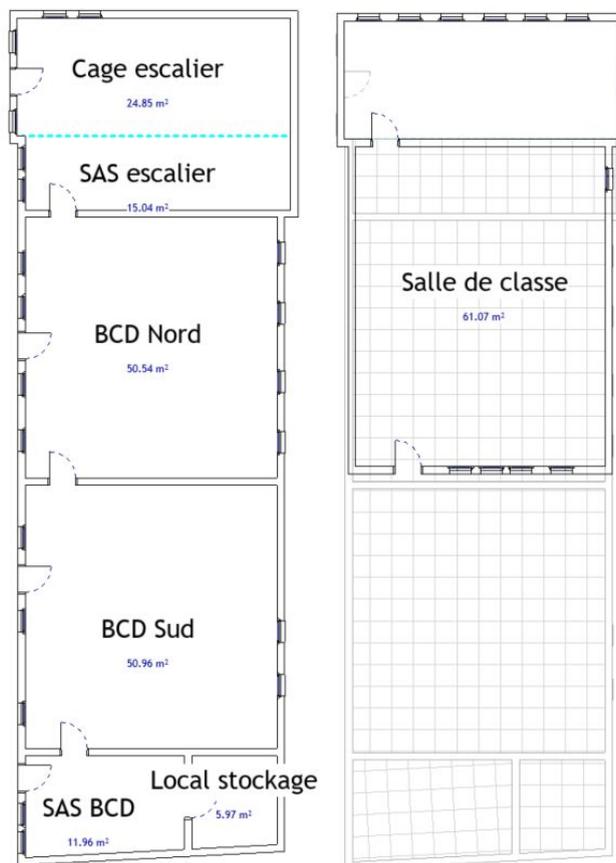


Figure IV-1 : Maquette Revit utilisée pour l'étude

Les paramètres utilisés lors des simulations sont répertoriés ci-après.

1. Choix des matériaux de simulation

a. Matériaux de construction : Scénario réel

Dans le cadre de ce projet d'écoconstruction, une attention particulière a été portée sur le choix des matériaux et des matériaux biosourcés ont notamment été utilisés.

Les matériaux de construction employés dans les différentes pièces sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau IV-2).

Les plans et documents fournis pour l'étude ont été utilisés pour réaliser la maquette des bureaux et définir la répartition des matériaux dans chacune des pièces.

Pièce	Mur	Sol	Plafond
BCD nord	Mur est : brique terre crue + enduit terre crue	Parquet neuf chêne + vernis + colle	Plaque de plâtre peinte
	Mur nord : épicéa 3 plis 2,1m + terre crue au dessus		
	Mur ouest : épicéa 3 plis 2,1m + terre crue au dessus		
	Mur sud : épicéa 3 plis		
BCD sud	Mur nord : épicéa 3 plis	Parquet neuf chêne + vernis + colle	Plaque de plâtre peinte
	Mur est : brique terre crue + enduit terre crue		
	Mur sud : épicéa 3 plis 2,1m + terre crue au dessus		
	Mur ouest : épicéa 3 plis 2,1m + terre crue au dessus		
Sas BCD	Epicéa 3 plis	Parquet réemploi + vernis + colle	Plaque de plâtre peinte
Local stockage	Plaque de plâtre peinte	Parquet réemploi + vernis + colle	Plaque de plâtre peinte
Salle de classe R+1	Mur nord : paroi épicéa 3 plis, enduit terre crue au-dessus de 1m30	Parquet neuf chêne + vernis + colle	Plafond en fibralith clarté brut
	Autres murs : parois en épicéa 3 plis		

SAS escalier	Epicéa 3 plis	Parquet réemploi + vernis + colle	Plaque de plâtre peinte
Cage escalier	Epicéa 3 plis	Parquet neuf sur palier R+1 + vernis + colle	Plaque de plâtre peinte

Tableau IV-2 : Récapitulatif des matériaux dans les pièces (Scénario réel)

Pour rendre compte au mieux des émissions potentielles de polluants par les matériaux de construction dans le futur bâtiment, les fabricants de matériaux ont été contactés pour obtenir les rapports d'émissions de leurs produits.

Ces derniers ont ainsi pu être obtenus pour les deux matériaux suivants :

- la peinture ignifuge Teknosafe 2457 (recouvrant les panneaux en Epicéa 3 plis)
- la plaque de plâtre Fermacell

Pour les matériaux dont les rapports d'émissions n'étaient pas disponibles, une correspondance a été faite avec ceux disponibles dans la base de donnée d'INDALO. Ce sont des matériaux pour lesquels on dispose de données d'émissions de polluants fiables, obtenues *via* des mesures en laboratoire.

Les différents choix ont été fait en tenant compte au maximum des descriptions des matériaux, de leur constitution, de leurs labels environnementaux et de toutes autres informations utiles pour obtenir la correspondance la plus proche.

Bien qu'elle ne constitue pas une correspondance exacte, cette approximation permet de réaliser des projections avec des émissions réelles de matériaux.

Les matériaux de construction prévus et leur correspondance dans INDALO sont répertoriés dans le tableau ci-dessous (Tableau IV-3).

Matériau - entreprise, label	Correspondance INDALO & label
Panneau 3 plis épicea - Elka, A+	Contreplaqué en épicea, A++*
Plafond Fibralth clarté - Knauf, A+	Panneau de laine minérale, A++*
Peinture LUMA - Technic production (sur plaque de plâtre), A+	Peinture ALGO, A++*
Parquet massif Surchant - Chêne de l'est, A+	Parquet chêne (incluant le verni), A++*/ E1/M1
Vernis Révélation 2K - CBM (Blanchon), A+	

Tableau IV-3 : Correspondance matériaux réels - INDALO (Scénario réel)

*A++ est un niveau propre à notre base de données, destiné à des matériaux émettant deux fois moins de polluants qu'un matériau A+

b. Matériaux de construction : variante conventionnelle

Dans le cadre de ce projet, un effort a été fait en faveur de matériaux peu émissifs. Il a donc été choisi de réaliser une variante de simulation où les matériaux utilisés sont ceux communément choisis lors d'un projet classique, dit *conventionnels*. Cette variante permet de quantifier les gains obtenus en termes de qualité d'air intérieur quand une attention particulière est portée sur le choix des matériaux.

Les équivalents conventionnels des matériaux de construction réels sont résumés dans le tableau IV-4.

Solution mise en oeuvre pour la Petite Fabrique Ivry Levassor	Solution conventionnelle pour comparaison
Matériau & entreprise	Équivalent conventionnel & Label
Panneau 3 plis épicea, Elka	Plaque de plâtre BA13 type gyptone de chez BPB Placo, A+
Plafond Fibralth clarté, Knauf	Faux plafond en fibre minérales types Ultima+ Tegular des établissements ARMSTRONG, A+
Peinture LUMA, Technic production (sur plaque de plâtre)	<ul style="list-style-type: none"> - Peinture sous couche Super Dulprim de chez Guittet, C - Peinture type Soytex de la société Seigneurie (Acrylique), A
Parquet massif Surchant, Chêne de l'est Vernis Révélation 2K, CBM (Blanchon)	Revêtement de sols souples vinylique, TARALAY PREMIUM CONFORT des Ets Gerflor, A+
	Colle sol Acrymang de chez Bostik, A+
Peinture ignifuge Teknosafe 2457 (recouvrant les panneaux en Épicéa 3 plis)	<ul style="list-style-type: none"> - Peinture sous couche Super Dulprim de chez Guittet, C - Peinture type Soytex de la société Seigneurie (Acrylique), A
Plaque de plâtre Fermacell	Plaque de plâtre BA13 type gyptone de chez BPB Placo, A+

Tableau IV-4 : Équivalents conventionnels des matériaux de construction réels

Les équivalents conventionnels des matériaux de construction tels qu'ils auraient été employés dans les différentes pièces sont ensuite résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau IV-5).

Pièce	Mur	Sol	Plafond
BCD nord	Plaque de plâtre BA13	Revêtement de sols	Plaque de plâtre BA13

	(type gyptone, BPB Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)	souples vinylique (TARALAY PREMIUM CONFORT, Ets Gerflor) + Colle sol (Acrymang, Bostik)	(type gyptone, BPB Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)
BCD sud	Plaque de plâtre BA13 (type gyptone, BPB Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)	Revêtement de sols souples vinylique (TARALAY PREMIUM CONFORT, Ets Gerflor) + Colle sol (Acrymang, Bostik)	Plaque de plâtre BA13 (type gyptone, BPB Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)
Sas BCD	Plaque de plâtre BA13 (type gyptone, BPB Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)	Revêtement de sols souples vinylique (TARALAY PREMIUM CONFORT, Ets Gerflor) + Colle sol (Acrymang, Bostik)	Plaque de plâtre BA13 (type gyptone, BPB Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)
Local stockage	Plaque de plâtre BA13 (type gyptone, BPB Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)	Revêtement de sols souples vinylique (TARALAY PREMIUM CONFORT, Ets Gerflor) + Colle sol (Acrymang, Bostik)	Plaque de plâtre BA13 (type gyptone, BPB Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)
Salle de classe R+1	Plaque de plâtre BA13 (type gyptone, BPB Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)	Revêtement de sols souples vinylique (TARALAY PREMIUM CONFORT, Ets Gerflor) + Colle sol (Acrymang, Bostik)	Faux plafond en fibre minérales (types Ultima+ Tegular, ARMSTRONG)
SAS escalier	Plaque de plâtre BA13 (type gyptone, BPB Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)	Revêtement de sols souples vinylique (TARALAY PREMIUM CONFORT, Ets Gerflor) + Colle sol (Acrymang, Bostik)	Plaque de plâtre BA13 (type gyptone, BPB Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)
Cage escalier	Plaque de plâtre BA13 (type gyptone, BPB	Revêtement de sols souples vinylique	Plaque de plâtre BA13 (type gyptone, BPB

	Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)	(TARALAY PREMIUM CONFORT, Ets Gerflor) + Colle sol (Acrymang, Bostik)	Placo) + Peinture sous couche (Super Dulprim, Guittet) + Peinture (type Soytex, Seigneurie)
--	---	---	---

Tableau IV-5 : Récapitulatif des matériaux dans les pièces (Scénario conventionnel)

Enfin, le tableau IV-6 ci-après reprends les équivalents conventionnels avec leur niveau en terme d'émissions de polluants et leurs équivalents déterminés dans la base de données INDALO et utilisés pour les simulations.

Équivalent conventionnel & Label	Correspondance INDALO & Label
Plaque de plâtre BA13 type gyptone de chez BPB Placo, A+	Plaque de plâtre, Lastre PLACO BA13, A+
Faux plafond en fibre minérales types Ultima+ Tegular des établissements ARMSTRONG, A+	Panneau acoustique, A+
<ul style="list-style-type: none"> - Peinture sous couche Super Dulprim de chez Guittet, C - Peinture type Soytex de la société Seigneurie (Acrylique), A 	Peinture (acrylique), C
Revêtement de sols souples vinylique, TARALAY PREMIUM CONFORT des Ets Gerflor, A+	Revêtement de sol vinyle, A+
Colle sol Acrymang de chez Bostik, A+	Adhésif (pour sol), A+
<ul style="list-style-type: none"> - Peinture sous couche Super Dulprim de chez Guittet, C - Peinture type Soytex de la société Seigneurie (Acrylique), A 	Peinture (acrylique), C
Plaque de plâtre BA13 type gyptone de chez BPB Placo, A+	Plaque de plâtre, Lastre PLACO BA13, A+

Tableau IV-6 : Correspondance matériaux conventionnels - INDALO (Scénario conventionnel)

A noter qu'une couche primaire de niveau C selon l'étiquetage réglementaire français est appliquée sur les plaques de plâtres dans le cadre de la simulation *conventionnelle*, et qu'une peinture de niveau A est également ajoutée par-dessus.

c. Âge des matériaux

Les matériaux répertoriés dans les paragraphes précédents sont neufs. En conséquence, l'âge des matériaux utilisés dans INDALO a été choisi comme étant "1 mois". Ceci

correspond à des données d'émissions provenant de mesures faites à 28 jours, et impliquant donc des matériaux émettant encore des niveaux de polluants élevés, comme à la réception d'un bâtiment.

2. Occupation

L'occupation est modélisée dans INDALO en nombre de personnes par pièce au cours du temps, et permet de de simuler les niveaux de CO₂. Le Tableau IV-7 détaille l'occupation dans les différentes pièces.

Pièce	Occupation	Horaires
BCD nord et sud	15 enfants 1 adulte	Lundi au vendredi <ul style="list-style-type: none"> ● 8h30 - 12h ● 13h30 - 17h30
Salle de classe	30 enfants 2 adultes	Lundi au vendredi <ul style="list-style-type: none"> ● 8h30 - 12h ● 13h30 - 16h30

Tableau IV-7 : récapitulatif de l'occupation appliquées dans les pièces

3. Fonctionnement du système de ventilation

Les deux salles Bibliothèque Nord et Sud sont équipées d'un système de ventilation double flux permettant d'en renouveler l'air.

La salle de classe située au R+1 est renouvelée *via* un conduit d'extraction par tirage naturel combiné à l'utilisation de fenêtres pariétodynamiques.

Les débits de conception appliqués dans les différentes pièces ont été résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau IV-8).

Ces derniers sont issus des hypothèses faites lors de l'étude thermique de ce même bâtiment. La ventilation est supposée active uniquement en période d'occupation.

Pièce	Débit de reprise (m ³ /h)	Débit de soufflage (m ³ /h)	Entrées d'air
BCD nord	253 m ³ /h	253 m ³ /h	-
BCD sud	253 m ³ /h	253 m ³ /h	-
Salle de classe	388 m ³ /h	-	16 entrée d'air - 45 m ³ /h

Tableau IV-8 : récapitulatif des débits de reprise et de soufflage appliqués dans les pièces
Etude qualité de l'air intérieur - Extension du groupe scolaire Ivry Levassor - Octopus Lab

4. Etanchéité des parois

L'étanchéité des parois du bâtiment donnant sur l'extérieur a été supposée comme égale à $0,60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ selon l'étude thermique de celui-ci.

Les portes et les fenêtres sont supposées être constamment fermées.

5. Scénarios de simulation

Les simulations sont réalisées sur une période d'une semaine pour correspondre à une semaine type.

Pour cette étude, les simulations ont été réalisées sur la semaine du 19 février au 25 février 2018 durant laquelle les niveaux extérieurs de particules fines étaient élevés.

Deux scénarios de simulation ont été proposés et seront différenciés par la suite :

- Scénario *1-réel*, correspondant au bâtiment tel qu'il a été défini
- Scénario *2-conventionnel*, correspondant à la variante conventionnelle utilisant des matériaux dits "classiques"

V. Résultats de simulation

L'intégralité du bâtiment a été modélisé afin de réaliser les simulations de qualité d'air intérieur. Pour une meilleure lisibilité, nous avons choisi de focaliser l'analyse des résultats dans les deux pièces suivantes :

- la Bibliothèque Centre Documentaire Sud
- la salle de classe au R+1

En effet, ces pièces ont des usages et des choix de conceptions représentatifs des autres pièces non listées.

L'étude des niveaux de CO₂ permet en général de démontrer l'efficacité du système de ventilation installé. Ils ont donc été analysés dans les pièces citées.

Les niveaux en formaldéhyde et en Composés Organiques Volatils Totaux (COVT) ont également été étudiés dans les pièces citées, dans le cas des deux scénarios proposés.

1. Dioxyde de carbone (CO₂)

L'évolution du CO₂ au cours de la semaine a été étudiée et comparée aux seuils limites (II-2-c). Pour rappel, le seuil de 1300 ppm correspond à un renouvellement de l'air correct et une qualité de l'air intérieur acceptable. Le seuil de 1700 ppm correspond à de l'inconfort et le renouvellement de l'air est jugé insuffisant.

La Figure V-1 montre la concentration moyenne sur la semaine en CO₂ dans chacune des pièces à l'aide d'une échelle de couleurs.

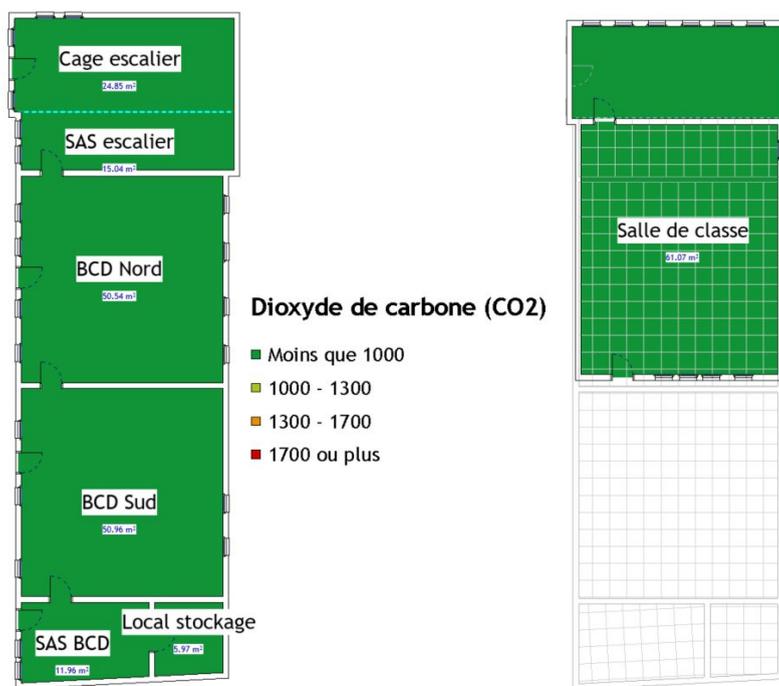


Figure V-1 : Moyenne sur une semaine de la concentration en CO₂ dans chacune des pièces

Un détail des résultats sur la semaine de simulation est disponible en annexe (VII-7).

Ainsi, les niveaux de CO₂ moyennée sur la semaine sont excellents et ne mettent pas en évidence de défauts de dimensionnement de la ventilation.

De plus, l'évolution temporelle des profils de CO₂ dans les deux pièces analysées (disponible en annexe VII-1) montre que les niveaux se situent toujours en dessous du 1er seuil limite de 1300 ppm.

Enfin, l'indice ICONÉ (Indice de CONfinement dans les Écoles) défini par l'article 8 du décret n°2015-1926 du 30 décembre 2015 a été calculé sur la base des résultats de simulation selon la méthode définie par le décret (Annexe VII-4).

La valeur d'indice obtenue est de 1, correspondant à un confinement faible, et respectant donc la valeur limite de 5.

2. Composés Organiques Volatils Totaux (COVT)

Les figures V-2 et V-3 montrent la moyenne sur la semaine de la concentration en Composés Organiques Volatils Totaux dans chacune des pièces, rapportée à une échelle de couleurs, pour les deux scénarios de simulation.

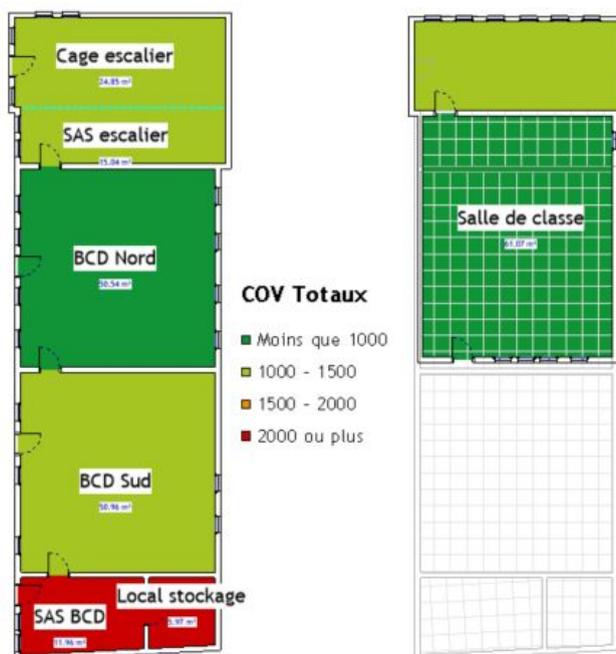


Figure V-2 : Moyenne sur une semaine de la concentration en COVT dans chacune des pièces, Scénario 1-réel

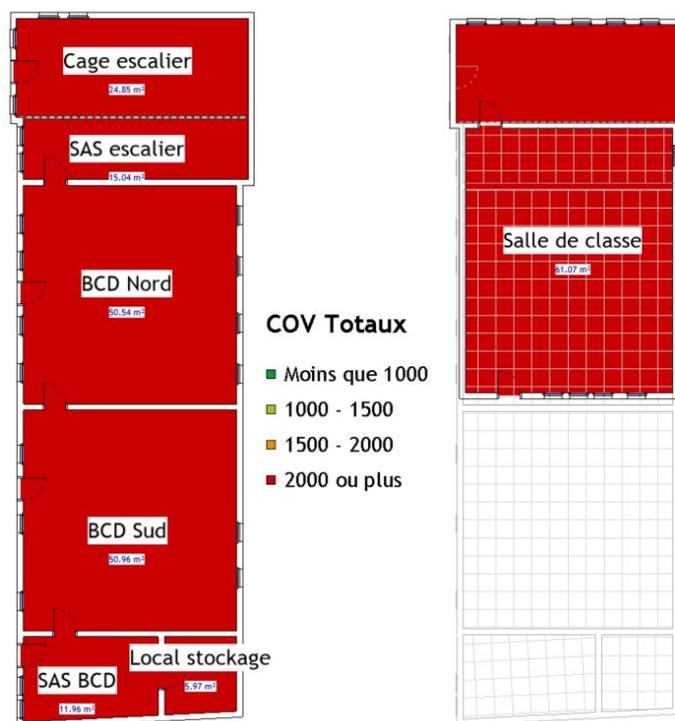


Figure V-3 : Moyenne sur une semaine de la concentration en COVT dans chacune des pièces, Scénario 2-conventionnel

Au cours de cette simulation, les uniques sources de COVs sont les matériaux de construction.

Les résultats détaillés sur la semaine dans les deux cas de simulation pour les pièces BCD Sud et Salle de classe sont disponibles en annexe (VII-2).

Faute de seuil réglementaire concernant cette classe de polluant, les niveaux de concentration en COVT ont été comparés à la première valeur de seuil de l'étiquetage réglementaire ($1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

- Dans le cas des matériaux réels (Scénario 1-réel) : moyennés sur la semaine, les niveaux en COVT dépassent le premier seuil de l'étiquetage réglementaire dans certaines salles, et sont élevés dans le SAS BCD ou le local de stockage. Ceci est dû au fait que la ventilation a été supposée active uniquement en période d'occupation. Ainsi en dehors des périodes d'occupation ces niveaux sont élevés, tandis qu'ils sont excellents lorsque les pièces sont occupées et que la ventilation est active (résultats détaillés en annexe (VII-2))
- Dans le cas des matériaux conventionnels (Scénario 2-conventionnel): les niveaux en COVT sont très élevés et dépassent le premier seuil de l'étiquetage dans toutes les salles.
Comme dans le cas des matériaux réels, il est important de rappeler que la ventilation a été supposée active uniquement en période d'occupation. Ainsi, lorsque la ventilation est active, les niveaux en COVT atteignent des seuils acceptables (résultats détaillés en annexe VII-2) bien que supérieurs aux niveaux atteints dans le cas du Scénario 1-réel.

3. Formaldéhyde

Les figures V-4 et V-5 montrent la moyenne sur la semaine de la concentration en formaldéhyde dans chacune des pièces, rapportée à une échelle de couleurs, en fonction du scénario de simulation.

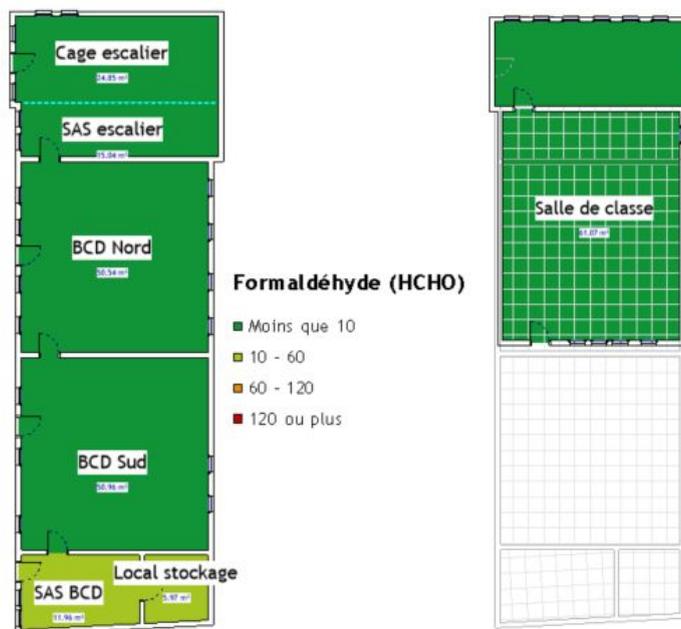


Figure V-4 : Moyenne sur une semaine de la concentration en formaldéhyde dans chacune des pièces, Scénario 1-réel

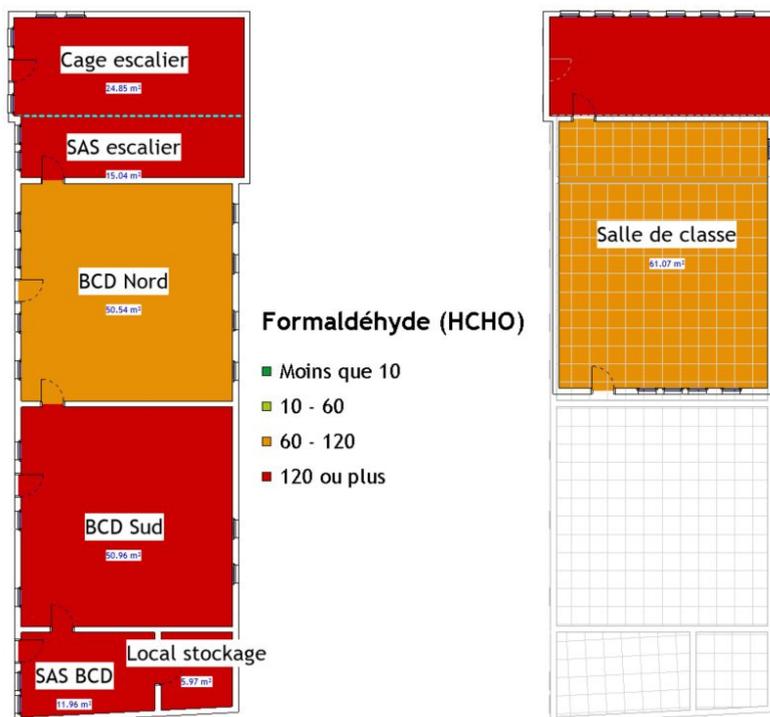


Figure V-5 : Moyenne sur une semaine de la concentration en formaldéhyde dans chacune des pièces, Scénario 2-conventionnel

Le formaldéhyde présent dans l'air intérieur provient des émissions des matériaux de construction et des réactions chimiques pouvant avoir lieu en phase gazeuse.



Les résultats détaillés sur la semaine pour les deux scénarios de simulation pour les pièces BCD Sud et Salle de classe sont disponibles en annexe (VII-3).

La valeur guide réglementaire à long terme de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (II-2-a) a été utilisée comme seuil de comparaison pour estimer l'état de la qualité de l'air en terme de concentration en formaldéhyde.

- Grâce aux choix de matériaux qui ont été fait, les niveaux de formaldéhyde sont excellents dans les différentes pièces, et ce même en dehors des périodes d'occupation lorsque la ventilation est inactive.
- En revanche, dans le cas d'utilisation de matériaux conventionnels, les niveaux de formaldéhyde sont bien plus élevés et constamment au dessus de la valeur guide réglementaire à long terme de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (même avec la ventilation active). Ils sont cependant inférieurs à la valeur limite de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ fixé pour les écoles selon l'article 8 du décret n°2015-1926 du 30 décembre 2015 (II-2-a).

VI. Conclusions

1. Récapitulatif

Le tableau VI-1 résume la moyenne sur une semaine des résultats obtenus pour les différents polluants modélisés dans le BCD Sud et la salle de classe, pour les deux scénarios de simulation, et permet de les comparer aux valeurs guides indiquant une bonne qualité de l'air.

Polluant	BCD Sud		Salle de classe		Valeur guide	Comparaison	
	Réels	Conventionnel	Réels	Conventionnel		Réels	Conventionnel
Formaldéhyde	10 µg/m ³	111 µg/m ³	5 µg/m ³	111 µg/m ³	30 µg/m ³	OK	⊗
COVT	1193 µg/m ³	2469 µg/m ³	790 µg/m ³	2288 µg/m ³	1000 µg/m ³	OK	⊗
ICONE (CO ₂)	1		1		5	OK	

Tableau VI-1 : Moyenne sur la semaine

Le même tableau a été réalisé dans le cas d'une moyenne uniquement en période d'occupation (Tableau VI-2), afin de montrer l'impact de la pollution sur ses occupants et lorsque la ventilation est active.

Polluant	BCD Sud		Salle de classe		Valeur guide	Comparaison	
	Réels	Conventionnel	Réels	Conventionnel		Réels	Conventionnel
Formaldéhyde	3 µg/m ³	39 µg/m ³	2 µg/m ³	45 µg/m ³	30 µg/m ³	OK	⊗
COVT	273 µg/m ³	738 µg/m ³	277 µg/m ³	900 µg/m ³	1000 µg/m ³	OK	OK
ICONE (CO ₂)	1		1		5	OK	

Tableau VI-2 : Moyenne durant les périodes d'occupation (et de fonctionnement de la ventilation)

Enfin, le tableau VI-3 montre la diminution obtenue sur les concentrations des polluants avec l'utilisation de matériaux sains dans le cas du scénario 1-réel, par rapport au scénario avec les matériaux conventionnels (scénario 2-conventionnel).

Polluant	BCD Sud		Salle de classe	
	Sur la semaine	En période d'occupation	Sur la semaine	En période d'occupation
Formaldéhyde	91%	92%	95%	96%
COVT	52%	63%	65%	69%

Tableau VI-3 : Diminution obtenue sur les concentration de polluants avec le scénario 1-réel par rapport au scénario 2-conventionnel

Les simulations qui ont été réalisées permettent de valider que le dimensionnement de la ventilation permet d'évacuer les émissions de dioxyde carbone.

Dans le cas d'utilisation des matériaux réels et plutôt vertueux, la ventilation permet également de maintenir une bonne qualité d'air intérieur au sein des pièces.

Les simulations montrent notamment qu'il est possible de désactiver la ventilation en dehors des périodes d'occupation, sans pour autant que les concentrations remontent à des niveaux trop haut jusqu'à sa réactivation et au retour des occupants.

Les choix de matériaux qui ont été réalisés en supposant qu'ils aient été installés dans les règles de l'art et selon les préconisations requises, permettent de maintenir les niveaux de concentration des polluants étudiés (COVT, formaldéhyde et CO₂) en dessous des seuils d'alertes.

En outre, l'emploi de matériaux sains a permis de réduire les niveaux de polluants de **63%** au minimum (COVT, BCD sud en période d'occupation) et jusqu'à **96%** dans le meilleur des cas (formaldéhyde, salle de classe en période d'occupation) par rapport à l'utilisation de matériaux conventionnels.

En effet, l'utilisation de matériaux conventionnels auraient dégradé la qualité de l'air intérieur, et ce même en période d'occupation quand la ventilation est active.

Les niveaux de formaldéhyde auraient notamment dépassé la valeur guide à long terme.

2. Recommandations

Aucune recommandation particulière n'est à ajouter pour ce bâtiment qui présente une excellente qualité de l'air lorsque son système de ventilation est actif, et dans le cas de l'utilisation des matériaux vertueux.



Il est cependant important de rappeler que le système de ventilation prévu pour la salle de classe située au R+1 fonctionne *via* un conduit d'extraction par tirage naturel combiné à l'utilisation de fenêtres pariétodynamiques.

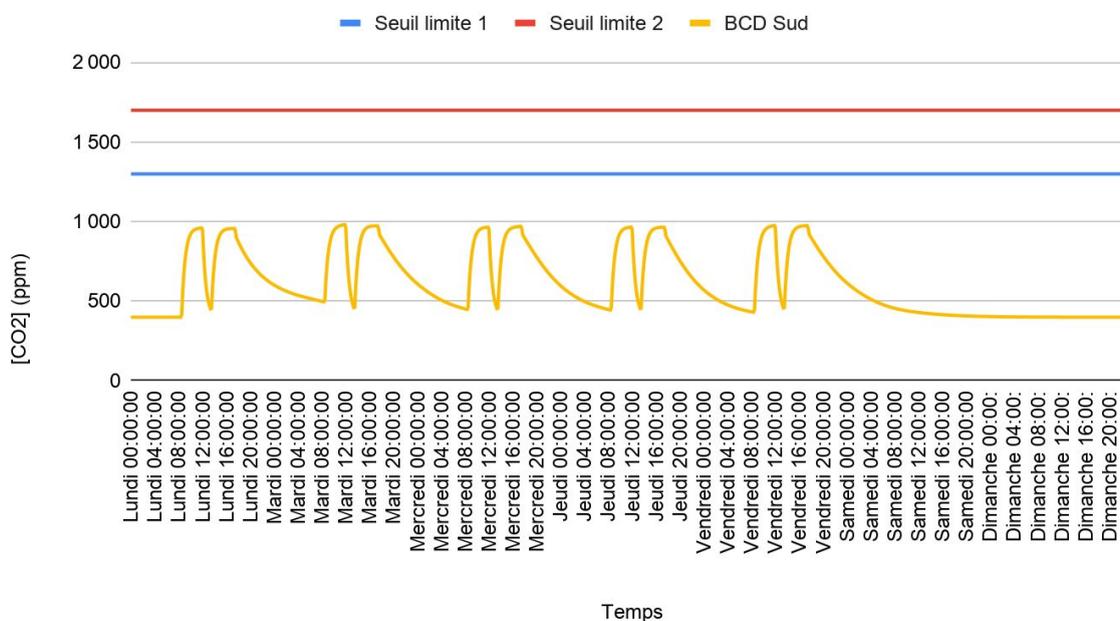
Dans le cas de la modélisation, et conformément aux hypothèses de l'étude thermique associée, ce système a été modélisé par un flux imposé et maintenu.

Il n'est donc pas assuré que dans la réalité les flux supposés soient constamment maintenus. Ainsi en cas de sous-renouvellement de l'air, la qualité de l'air en période d'occupation pourrait atteindre les niveaux simulés en période non-ventilation dans le pire des cas.

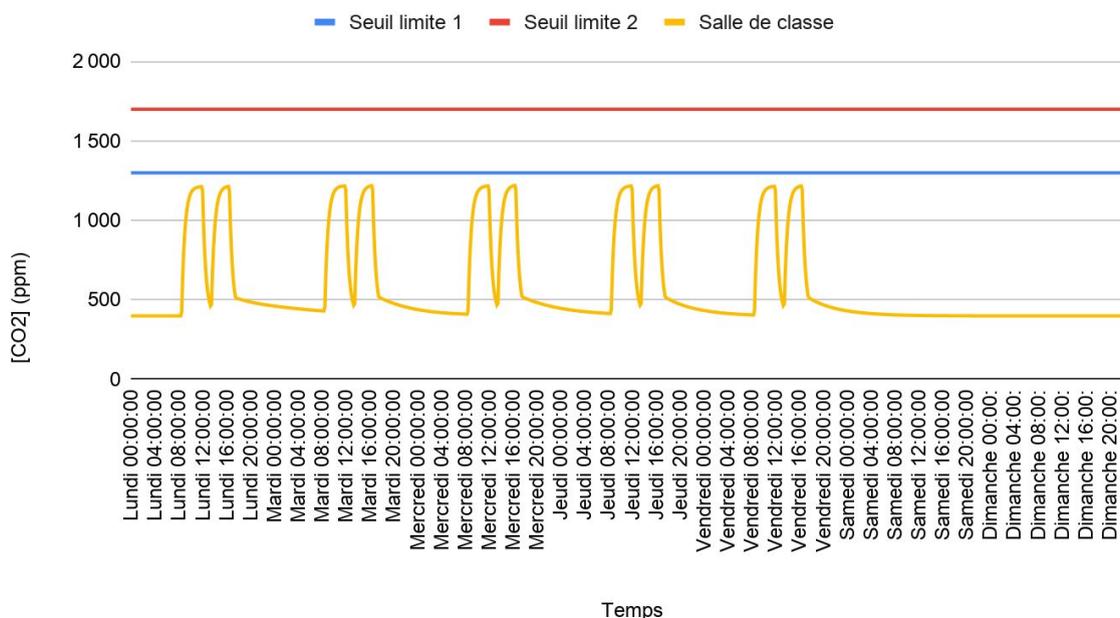
VII. Annexes

1. Résultats Dioxyde de carbone (CO₂)

Seuil limite 1, Seuil limite 2, BCD Sud

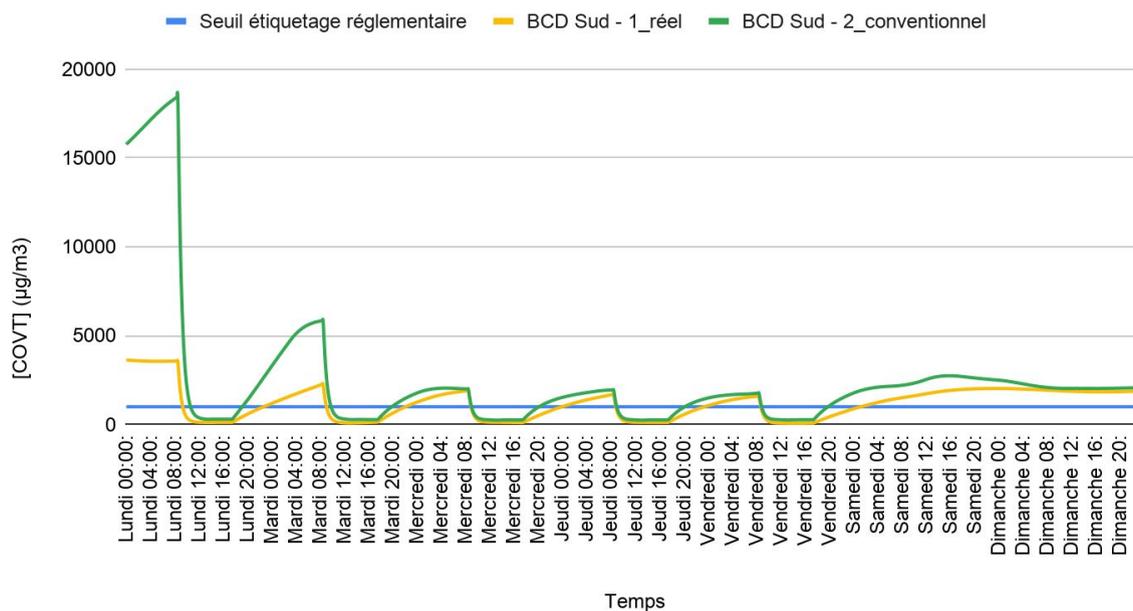


Seuil limite 1, Seuil limite 2, Salle de classe

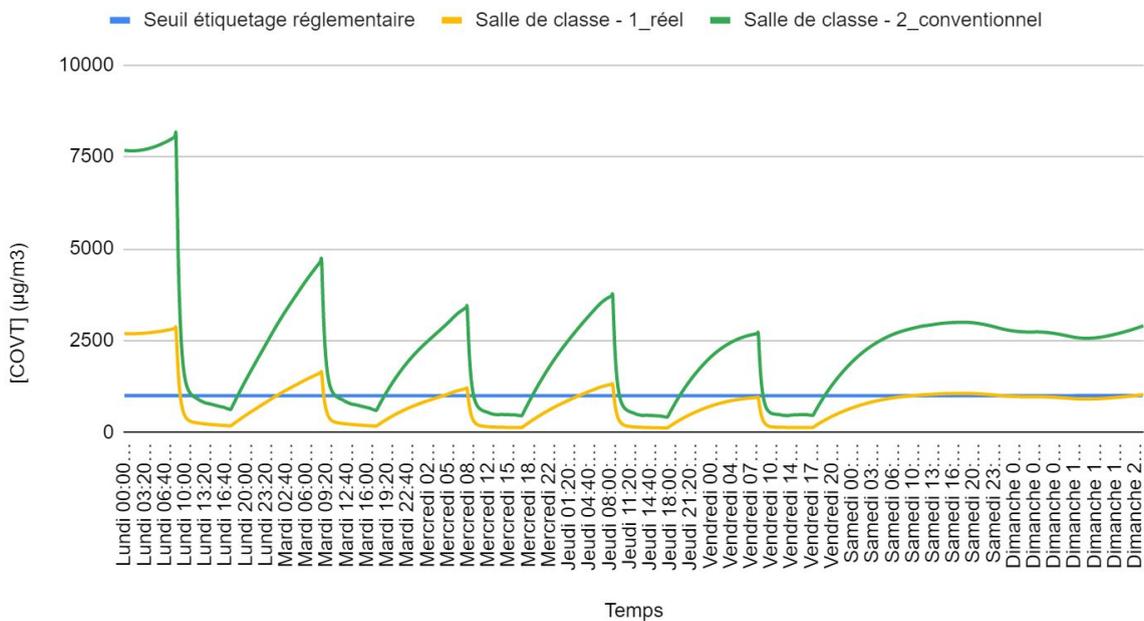


2. Résultats Composés Organiques Volatils Totaux (COVT)

Seuil étiquetage, BCD Sud

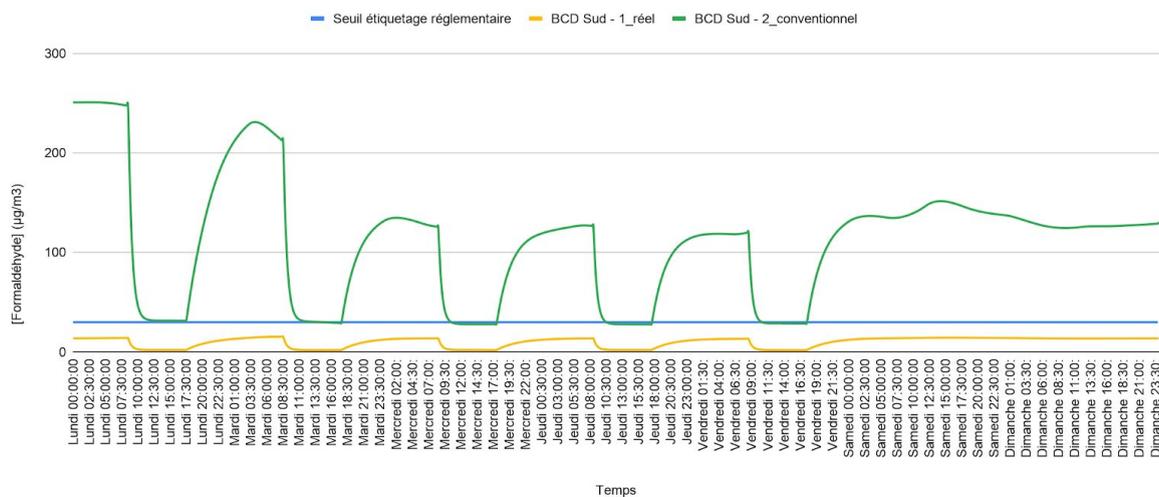


Seuil étiquetage, Salle de classe

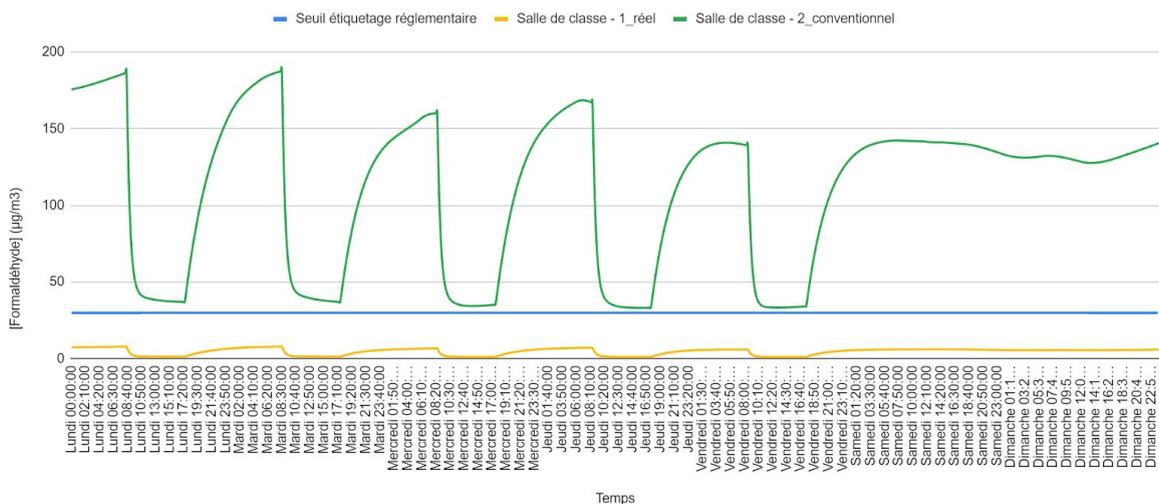


3. Résultats Formaldéhyde

Valeur guide, BCD Sud



Valeur guide, Salle de classe



4. Indice ICONE (Indice de CONfinement dans les Écoles)

D'après l'article 8 du décret n°2015-1926 du 30 décembre 2015 :

Les résultats de mesure du dioxyde de carbone sont exploités pour calculer un indice de confinement selon la méthode décrite ci-après.

L'indice de confinement est calculé à partir d'une mesure en continu de la concentration de dioxyde de carbone dans l'air, exprimée en parties par million (ppm), avec un pas de temps d'enregistrement de dix minutes.

La mesure en continu s'effectue pendant les seules périodes au cours desquelles le nombre d'élèves ou d'enfants effectivement présents dans la pièce est supérieur à 0,5 fois l'effectif théorique de la salle de classe ou d'activité et inférieur à 1,5 fois l'effectif théorique de la pièce.

Les concentrations de dioxyde de carbone correspondant aux périodes retenues sont ensuite séparées en trois classes en fonction du nombre de valeurs inférieures à 1 000 ppm, comprises entre 1 000 et 1 700 ppm et supérieures à 1 700 ppm.

L'indice de confinement est alors calculé suivant la formule :

$$ICONE = 8,3 \log_{10} (1 + f_1 + 3f_2)$$

Avec :

$$f_1 = \frac{n_1}{n_0 + n_1 + n_2} \text{ la proportion de valeurs comprises entre 1000 et 1700 ppm}$$

$$f_2 = \frac{n_2}{n_0 + n_1 + n_2} \text{ la proportion de valeurs supérieures à 1700 ppm}$$

et : n_0 le nombre de valeurs inférieures à 1000 ppm, n_1 le nombre de valeurs comprises entre 1000 et 1700 ppm et n_2 le nombre de valeurs supérieures à 1700 ppm

La valeur est ensuite arrondi à l'entier le plus proche et comparée au tableau suivant :

ICONE	Etat du confinement
0	Confinement nul
1	Confinement faible
2	Confinement moyen
3	Confinement élevé
4	Confinement très élevé
5	Confinement extrême

5. Benzène et formaldéhyde dans certains ERP

Le benzène et le formaldéhyde sont réglementés dans certains établissements recevant du public par le décret n°2012-14 du 5 janvier 2012 et le décret n°2011-1727 du 2 décembre 2011.

La réglementation fixe les valeurs limites à ne pas dépasser dans un espace clos ainsi que les différentes valeurs guides d'exposition à long terme.

- la Valeur Guide pour l’Air Intérieur (VGAI) désigne un niveau de concentration de polluants de l’air intérieur, déterminé pour un espace donné à atteindre à long terme pour protéger la santé des personnes
- la Valeur Limite (VL) désigne la valeur au-delà de laquelle des investigations complémentaires doivent être menées afin d’identifier et de neutraliser les sources, dans le but de ramener les niveaux en dessous de celle-ci

	Valeur Guide pour l’Air Intérieur		Valeur Limite
Formaldéhyde	30 µg/m ³ (2015)	10 µg/m ³ (2023)	100 µg/m ³
Benzène	5 µg/m ³ (2015)	2 µg/m ³ (2023)	10 µg/m ³

Tableau - Valeurs réglementaires relatives au benzène et au formaldéhyde