

EMIBIO

Emissions des matériaux biosourcés

RAPPORT FINAL



EXPERTISES

**Juillet
2022**

REMERCIEMENTS

L'équipe du projet d'EmiBio adresse ses sincères remerciements au Comité de pilotage, ainsi qu'à l'ADEME, à la Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature, et à la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires pour leur soutien. L'équipe projet remercie également les 2 communes qui ont accepté de mettre à disposition les 2 sites d'étude et sans qui ce projet n'aurait pas pu être réalisé, ainsi que les entreprises impliquées dans la construction et l'entretien des systèmes de chacun de ces deux sites pour avoir accepté de répondre à nos multiples questions. L'équipe projet remercie également l'ADEME Hauts-de-France pour nous avoir aidés à sélectionner les sites tests. Enfin, l'équipe projet remercie tous les confrères scientifiques qui ont accepté d'écouter et de lire, et qui nous ont posé des questions sur ce travail afin de nous aider à mûrir nos réflexions.

L'équipe du projet EmiBio :

Cerema (pilote)	Armines (IMT Nord-Europe)	Armines (IMT Atlantique)	LTI Université de Picardie Jules Verne	LGCgE Université d'Artois
Cécile CAUDRON Olivier LEMAITRE Lucie DEROO Samuel GOSSET Elise HALLEMANS Guillaume COULBAUX Maryse RENAUD Christine BUGAJNY	Nadine LOCOGE Liselotte TINEL Tamara BRAISH Ana Maria TOBON MONROY Laurence DELPECHIN Vincent GAUDION Romain DOS SANTOS	Yves ANDRES	Thierry LANGLET Anh Dung TRAN LE Omar DOUZANE	Emmanuel ANTCZAK Didier DEFER Franck BRACHELET

CITATION DE CE RAPPORT

CAUDRON Cécile, LEMAITRE Olivier, DEROO Lucie, GOSSET Samuel, HALLEMANS Elise, COULBAUX Guillaume, RENAUD Maryse, BUGAJNY Christine – Cerema ; LOCOGE Nadine, TINEL Liselotte, BRAISH Tamara, TOBON MONROY Ana Maria, DELPECHIN Laurence, GAUDION Vincent, DOS SANTOS Romain – Armines (IMT Nord-Europe), ANDRES Yves – Armines (IMT Atlantique) ; LANGLET Thierry, TRAN LE Anh Dung, DOUZANE Omar – LTI Université de Picardie Jules Verne ; ANTCZAK Emmanuel, DEFER Didier, BRACHELET Franck – LGCgE Université d'Artois. 2022. **EmiBio – Emissions des matériaux biosourcés – Rapport final**. 100 pages hors annexes, 161 pages avec annexes.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1703C0031

Étude réalisée par le Cerema, Armines (IMT Nord-Europe et IMT Atlantique), l'Université de Picardie et l'Université d'Artois, pour ce projet cofinancé par l'ADEME et la Direction Générale de l'Aménagement du Logement et de la Nature et la Direction Générale de la Prévention des Risques

Projet de recherche coordonné par : Cécile CAUDRON

Appel à projet de recherche : 2016

Coordination technique - ADEME :

HEBE Isabelle

Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie

Et : BOUALLALA Souad, Ingénieure Qualité de l'Air

Service Qualité de l'Air

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	9
ABSTRACT	10
1. CONTEXTE DU PROJET EMIBIO	11
1.1. Un sujet à enjeux	11
1.1.1. La QAI, une préoccupation sanitaire	11
1.1.2. Quid des matériaux biosourcés ?	11
1.2. Objectif du projet EmiBio et résultats escomptés	11
1.2.1. A l'échelle du matériau	11
1.2.2. A l'échelle de la paroi	12
1.2.3. A l'échelle du bâtiment	12
2. METHODOLOGIE GENERALE	13
3. DESCRIPTION DES BATIMENTS, DES PAROIS ET DES MATERIAUX ETUDIÉS	14
3.1. Bâtiment 1 – bâtiment ancien rénové – la mairie de Moncheaux	14
3.1.1. Description générale du bâtiment	14
3.1.2. Description des parois.....	14
3.1.3. Description des matériaux	15
3.2. Bâtiment 2 – bâtiment récent conçu en matériaux biosourcés – groupe scolaire	15
3.2.1. Description générale du bâtiment	15
3.2.2. Description des parois.....	16
3.2.3. Description des matériaux	17
4. COMPARAISON DES EMISSIONS DES MATERIAUX SEULS	18
4.1. Émissions des plaques de placo-plâtre	18
4.2. Émissions du pare-vapeur	19
4.3. Émissions de la laine de bois	19
4.4. Émissions de la ouate de cellulose	20
4.5. Émissions du panneau OSB	21
4.6. Émissions des éléments de l'ossature bois.....	22
4.7. Influence de l'humidité relative sur les émissions des différents matériaux testés	23
5. EMISSIONS A L'ECHELLE DE LA PAROI EN FONCTION DES CONDITIONS HYGROTHERMIQUES - CROISEMENT AVEC LES EMISSIONS DES MATERIAUX	24
5.1. Présentation des différentes parois testées	24
5.1.1. Choix des matériaux et reproduction des parois étudiées	24
5.1.2. Equipements et conditions d'essai.....	24
5.1.3. Comportement hygrothermique des murs étudiés	25
5.1.3.1. Comportement hygrothermique des murs M_norm et M_défav	25
5.1.3.2. Comportement hygrothermique du mur M_dégrad	27
5.1.3.3. Comportement hygrothermique du mur conventionnel M_conv	27
5.1.3.4. Comportement hygrothermique du mur du groupe scolaire M_GS	28

5.1.4.	Conclusion	28
5.2.	Mesures au niveau des parois: caractérisation des émissions et développement de micro-organismes	29
5.2.1.	Mur conventionnel.....	29
5.2.1.1.	Caractérisation du développement de micro-organismes dans les différentes parois	29
5.2.1.2.	Quantification des émissions de différentes parois : parties « ensemencées » et « non-ensemencées »	30
5.2.2.	Mur biosourcé laine de bois sous différentes conditions hygrothermiques.....	31
5.2.2.1.	Quantification des émissions de la paroi biosourcée fibre de bois dans des conditions hygrothermiques « normales ».....	31
5.2.2.2.	Évolution des émissions du mur biosourcé dans des conditions dégradées	32
5.2.2.3.	Comparaisons des émissions des parois défavorable et dégradée	33
5.2.2.4.	Spécificité des émissions associées à la paroi présentant des moisissures	37
5.2.3.	Mur biosourcé ouate de cellulose.....	39
5.2.3.1.	Démarche adaptée.....	39
5.2.3.2.	Caractérisation du développement de micro-organismes dans les différentes parois	39
5.2.4.	Comparaison des émissions de COV des trois parois avec les émissions des matériaux seuls.....	40
5.2.5.	Comparaison avec les émissions sur site	42
6.	EMISSIONS SUR SITES REELS ET POLLUTION DE L'AIR INTERIEUR EN FONCTION DES CONDITIONS HYGROTHERMIQUES	45
6.1.	Bâtiment 1 – bâtiment ancien rénové – la mairie de Moncheaux	45
6.1.1.	Synthèse du diagnostic bâtiment du site n°1	45
6.1.2.	Mesures en surfaces du site n°1	45
6.1.2.1.	Mur biosourcé: évolution hygrothermique annuelle et évolution des émissions sur 24h	45
6.1.2.2.	Évolution des émissions de différents murs biosourcés	51
6.1.2.3.	Évolution des émissions de l'ensemble des surfaces.....	55
6.1.3.	Caractérisation des concentrations ambiantes du site n°1.....	57
6.1.3.1.	Mesures en continu sur 2 semaines	57
6.1.3.2.	Évolution spéciée des COV sur 24h.....	60
6.1.3.3.	Mise en regard des concentrations mesurées en air intérieur et émissions surfaciques mesurées pour quelques COV	62
6.1.3.4.	Caractérisation des micro-organismes en lien avec les conditions environnementales	63
6.2.	Bâtiment 2 – bâtiment récent conçu en matériaux biosourcés – le groupe scolaire	64
6.2.1.	Synthèse du diagnostic bâtiment du site n°2.....	64
6.2.2.	Mesures en surfaces du site n°2	65
6.2.2.1.	Mur biosourcé: évolution hygrothermique annuelle et évolution des émissions sur 24h	65
6.2.2.2.	Evolution des émissions de différents murs biosourcés	70
6.2.2.3.	Évolution des émissions de l'ensemble des surfaces.....	80
6.2.3.	Caractérisation des concentrations ambiantes du site n°2.....	82
6.2.3.1.	Mesures en continu sur 2 semaines	82
6.2.3.2.	Évolution spéciée des COV sur 24h.....	83
6.2.3.3.	Mise en regard des concentrations mesurées en air intérieur et émissions surfaciques mesurées pour quelques COV	85
6.2.3.4.	Caractérisation des micro-organismes en lien avec les conditions environnementales	86
7.	SYNTHESE DES DONNEES PRODUTES & MODELE SIMPLIFIE	87
7.1.	Synthèse thématique des données produites <i>in situ</i> et en laboratoire.....	87
7.1.1.	Prélèvements microbiens.....	87
7.1.2.	Transferts hygrothermiques.....	87
7.1.3.	Emissions des matériaux et des parois	87

7.1.4. Polluants retrouvés dans l'air intérieur.....	88
7.2. Modèle simplifié et exemple d'application	89
7.2.1.1. Description du modèle et hypothèses	89
7.2.1.2. Application du modèle.....	89
8. ENSEIGNEMENTS & PERSPECTIVES	92
8.1. Tableau récapitulatif des enseignements.....	92
8.2. Limites – Recommandations – Perspectives.....	93
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	95
VALORISATION DU PROJET EMIBIO.....	96
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES	97
SIGLES ET ACRONYMES.....	100
ANNEXES.....	101
Annexe 1 – Diagnostic bâti de la mairie de Moncheaux	101
Introduction.....	101
Sources de pollution extérieures.....	101
Sources de pollution intérieures	102
Système de ventilation et entretien.....	106
Comportement des occupants	112
Conclusion du diagnostic bâtiment sur la mairie de Moncheaux.....	112
Annexe 2 – Diagnostic bâti du groupe scolaire	113
Introduction.....	113
Sources de pollution extérieures.....	115
Sources de pollution intérieures	115
Système de ventilation et entretien.....	120
Comportement des occupants	128
Conclusion du diagnostic bâtiment sur le groupe scolaire.....	129
Annexe 3 – Reproduction parois dans le laboratoire LTI-UPJV Amiens.....	130
Reproduction de la paroi dans le laboratoire LTI-UPJV Amiens – Mur de Moncheaux.....	130
Composition de la paroi	130
Résultats du Mur de la mairie de Moncheaux – Mur_M_norm.....	134
Résultats du Mur de Moncheaux – Mur_M_défav	136
Résultats du Mur de Moncheaux – Mur_M_dégrad	139
Résultats du Mur conventionnel – Mur_conv	144
Résultats du Mur du groupe scolaire: M_GS.....	147
Annexe 4 – Tableau des valeurs guides du développement microbien (E.V. Brauner et al. / Building a<LOD Environment 82 (2014) 190-202)	148
Annexe 5 – Méthodologie déployée <i>in situ</i>	149
Mesures dans l'air intérieur	149
Mesures surfaciques.....	149
Annexe 6 – Tableau des valeurs des COV majeurs mesurées dans l'air intérieur sur chacun des 2 sites, en été comme en hiver	151
Annexe 7 – Foire aux questions du projet EmiBio.....	158

RÉSUMÉ

La réglementation environnementale 2020, dite RE2020, a remplacé au 1^{er} janvier 2022 la réglementation thermique 2012 et intègre désormais une analyse du cycle de vie des matériaux de construction.

Afin d'ancrer l'utilisation des matériaux biosourcés dans le bâtiment de demain, ce projet a cherché à évaluer leurs émissions spécifiques (venant notamment de micro-organismes ou éventuellement des additifs), tout en prenant en considération les atouts hygrothermiques de ces matériaux. Ce projet EmiBio s'insère ainsi dans une démarche positive auprès de la filière des matériaux biosourcés qu'il convient d'encourager.

Les matériaux biosourcés étudiés sont des isolants, et plus particulièrement la laine de bois et la ouate de cellulose car ce sont les isolants ayant la plus grande part de marché actuellement parmi les matériaux biosourcés (hors bois de structure). Les 2 bâtiments suivis dans le cadre de ce projet sont isolés avec ces matériaux.

Ce projet a permis d'étudier les émissions des matériaux eux-mêmes en laboratoire, mais aussi les émissions des parois contenant ces matériaux, à la fois sur 2 sites réels, mais également en environnement maîtrisé (en cellule expérimentale). L'étude des polluants présents dans l'air des 2 bâtiments réels étudiés n'a pas permis d'établir une signature des émissions des matériaux biosourcés sur la qualité de l'air intérieur, les polluants étant en quantité trop faible dans l'air et non émis spécifiquement par les matériaux biosourcés étudiés. En revanche, le projet a permis de bien mettre en évidence l'absence de développement microbien tant que la gestion de l'humidité relative dans les matériaux / parois est assurée. Un non-respect des règles de l'art en environnement hygrothermique dégradé peut être le siège, quant à lui, de développement microbien. Dans l'air intérieur, aucune espèce spécifique n'a été identifiée pour marquer la présence de matériaux biosourcés.

ABSTRACT

The new environmental regulation, RE2020, which replaces the former thermal regulation RT2012, incorporates a life cycle analysis for building materials.

To promote the use of bio-based materials in future buildings, this project has assessed their specific emissions (from microorganisms or additives), while taking into account the hygrothermal strengths of these materials. This project, EmiBio, aims to have a positive approach to the sector of bio-based materials which should be supported.

The biobased materials studied have been insulation's materials, especially the wood wool and cotton cellulose insulation, because currently, they have the largest market share among the bio-based materials market (excluding wood structure). Both of the two buildings monitored in this project are insulated from the indoor side with these materials.

This project has studied the emissions of the materials themselves in lab conditions, but also the emissions from the walls containing these materials, both in two real buildings, and in a controlled environment – an experimental cell. The study of the indoor air pollutants of the 2 studied buildings did not allowed to establish a signature of the biosourced materials' emissions on indoor air quality, because the pollutants were in too low quantity in the air and not emitted specifically by the studied biosourced materials. On the other hand, the project made it possible to clearly highlight the absence of microbial development as long as the management of the relative humidity in the materials / walls is ensured. In the opposite, a non-compliance with the rules of the art in a degraded hygrothermal environment can be the seat of microbial development. In indoor air, no specific species has been identified to mark the presence of bio-based materials.

1. Contexte du projet EmiBio

1.1. Un sujet à enjeux

1.1.1. La QAI, une préoccupation sanitaire

Au même titre que la qualité de l'air extérieur, la qualité de l'air intérieur est un enjeu de santé public d'autant plus important que nous passons 80 à 95 % de notre temps dans des lieux clos au quotidien – logements, bureaux, écoles, moyens de transport, etc. Or, c'est un fait, l'air intérieur est pollué : les activités spécifiques réalisées dans les espaces clos et les sources de pollution sont différentes de l'extérieur, ce qui donne lieu à une pollution différente de celle de l'extérieur. De plus, son volume étant plus restreint que l'extérieur, les concentrations en polluants y sont souvent plus élevées.

Les actions publiques se renforcent sur le sujet de la QAI : le Plan National Santé Environnement n°4 « Mon environnement, ma santé » diffusé le 8 mai 2021 accentue les actions sur le volet QAI dans son Axe 2 « Réduire les expositions environnementales affectant notre santé » et lance l'évolution de la réglementation de surveillance de la QAI dans les ERP accueillant les enfants (action 13). Indépendamment, la crise sanitaire provoquée par le SRAS-19 (Covid-19) et commencée en mars 2020 en France a mis en exergue l'importance de respirer un air sain.

1.1.2. Quid des matériaux biosourcés ?

Un matériau biosourcé est produit à partir de matières premières issues de la biomasse, conformément à la norme NF EN 16575 [1]. Les matériaux biosourcés sont de plus en plus utilisés dans le bâtiment en France lors de rénovations ou en constructions neuves. Ainsi, en 2012, les isolants à base de ouate de cellulose et de fibre de bois représentaient la part la plus importante des produits biosourcés produits et distribués en France [2], devant les produits issus du chanvre et du lin. Depuis, si les proportions avec les autres produits biosourcés ont pu évoluer, ces matériaux restent les plus utilisés en France et méritent une attention particulière.

La filière des matériaux biosourcés est d'ailleurs soutenue par le Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires afin de se substituer aux matériaux issus de matière première fossile et limiter ainsi l'impact carbone du secteur bâtiment, ainsi que par l'ADEME¹.

1.2. Objectif du projet EmiBio et résultats escomptés

Le projet EmiBio se propose d'évaluer les émissions de Composés Organiques Volatils (COV) des principaux matériaux biosourcés, qu'il s'agisse de COV issus des additifs contenus dans les matériaux biosourcés, de réactions chimiques secondaires, ou liés au développement des micro-organismes qui pourront plus facilement se développer sur ces matériaux naturels dans certaines conditions hygrothermiques. Pour cela, cette étude se placera à différentes échelles, allant du matériau au bâtiment.

Tous les matériaux biosourcés ne pourront pas être étudiés sur ce seul projet. Les matériaux étudiés sont volontairement ciblés en fonction de la part de marché qu'ils représentent et donc de leur occurrence dans les bâtiments français [26] et [27]. Etant donné l'état actuel du marché des matériaux biosourcés, les matériaux ciblés sont la **laine de bois** et la **ouate de cellulose**.

Le projet EmiBio est donc un projet de recherche en connaissances nouvelles permettant d'enrichir l'état de l'art sur les matériaux biosourcés et leur éventuel impact sur la qualité de l'air intérieur, tout en adoptant une démarche positive vis-à-vis de cette filière d'avenir qu'il faut encourager. C'est pourquoi ce projet se propose de conclure ses travaux par l'écriture du contenu technique d'une plaquette de diffusion des résultats à destination des professionnels.

1.2.1. A l'échelle du matériau

- Identification et mesure à l'émission de COV et COVm spécifiques aux matériaux biosourcés étudiés, comparaison avec les données issues de la bibliographie => [paragraphe 4](#)
- Liste des COV et COVm spécifiques à chacun des matériaux biosourcés étudiés. Ces COV et COVm ne seront pas nécessairement identiques pour chacun des matériaux => [paragraphe 4](#)
- Caractérisation des émissions des différents matériaux entrant dans la constitution des parois des bâtiments « réels » => [paragraphe 4](#)

¹ Toutes les marques ou noms de produits cités sont des marques déposées par leurs propriétaires respectifs.

- Identification et quantification des micro-organismes autochtones initialement présents sur les matériaux biosourcés => [paragraphe 4](#)

1.2.2. A l'échelle de la paroi

- Etude de l'influence des conditions d'humidité et de température sur l'émission de COV et COVm spécifiques => [paragraphe 5.2](#)
- Investigation de la présence et identification des micro-organismes à l'intérieur des parois et des conditions hygrothermiques spécifiques de leur développement => [paragraphe 5.2](#)
- Comparaison des émissions de COV entre un isolant à base de laine minérale et un isolant issu de matériaux biosourcés => [paragraphes 4 et 5.2](#)
- Prévission des conditions hygrothermiques qui présentent un risque de développement de moisissures (non forcément visibles) au sein de la paroi, et en particulier dans des matériaux => [paragraphes 4 et 5](#)
- Comparaison entre une configuration de paroi montée selon les règles de l'art du matériau biosourcé concerné et une autre paroi comportant des erreurs courantes de pose => [paragraphe 5](#)
- Influence des conditions d'ambiance (température, hygrométrie) et des conditions d'usage sur les émissions de COV / COVm pour les isolants étudiés => [paragraphe 5](#)
- Comparaison des émissions de COV entre un isolant à base de laine minérale et un isolant issu de matériaux biosourcés => [paragraphes 4 et 5.2](#)
- Vérification de la présence de micro-organismes à l'intérieur des parois afin de faire le lien avec les mesures de COV réalisées en surface de parois => [paragraphe 5.2](#)
- Vérification de la plus-value à respecter les règles de l'art lors de la pose de l'isolant sur les émissions des matériaux biosourcés et le risque de pathologie => [paragraphe 5.2](#)

1.2.3. A l'échelle du bâtiment

- Evaluation du ratio entre COVm et COV et son évolution dans le temps lors des campagnes *in situ* menées dans des conditions différentes (campagnes hivernale et estivale). Il faudra ainsi déterminer si la quantité de COVm est négligeable ou non par rapport aux autres COV présents => [paragraphe 6](#)
- Mise en place d'un indicateur précoce du développement des micro-organismes => Non réalisable car pas de signature de la présence de micro-organisme réalisable
- Caractérisation de l'ambiance en termes de qualité de l'air intérieur et étude de sa dynamique d'évolution temporelle => [paragraphe 6.1.3 et 6.2.3](#)
- Comparaison des émissions des matériaux multi-couches mesurées à l'échelle de la paroi au laboratoire et sur le terrain afin de rapprocher les espèces émises sur site des empreintes associées au développement de micro-organismes établies au laboratoire => [paragraphes 4, 5 et 6](#)
- Caractérisation de l'ambiance intérieure et de l'évolution temporelle des concentrations d'espèces (COV, COVm, CO₂, etc.) à l'intérieur des bâtiments dans des conditions réelles => [paragraphe 6.1.3 et 6.2.3](#)
- Evaluation sur le terrain, dans les conditions réelles de deux bâtiments intégrant des matériaux biosourcés, des émissions des différentes surfaces du bâti => [paragraphe 6.1.2 et 6.2.2](#)
- Identification et quantification des espèces fongiques *in situ*, à relier aux matériaux biosourcés => [paragraphes 6.1.3.4 et 6.2.3.4](#)
- Etablissement des profils de température et de vapeur d'eau dans l'épaisseur de l'isolant au sein de la paroi => [paragraphes 6.1.2.1 et 6.2.2.1](#)
- Influence des échanges hygrothermiques de l'enveloppe sur la qualité de l'air intérieur => [paragraphes 5 et 6](#)
- Des pistes seront également proposées pour aider au développement d'un outil simplifié de calcul du taux de renouvellement d'air d'un local, en fonction des conditions hygrothermiques et d'usage, et des émissions de polluants par les matériaux mis en œuvre => [paragraphe 7.3](#)

2. Méthodologie générale

Afin de pouvoir déterminer s'il existe ou non une signature chimique de la pollution par les micro-organismes pouvant se développer sur les parois isolées en matériaux biosourcés, des focus à différentes échelles ont été réalisés :

- L'échelle du matériau
- L'échelle de la paroi
- L'échelle du bâtiment

Ainsi, des tests ont été réalisés sur 2 bâtiments réels distincts isolés avec les 2 matériaux biosourcés les plus utilisés actuellement en France (laine de bois et ouate de cellulose). Afin de reproduire plus fidèlement les phénomènes physiques et chimiques dans ces parois, celles-ci ont été reproduites en laboratoire et testées en cellule expérimentale en conditions maîtrisées. Dans le même temps, les matériaux utilisés pour reproduire les parois en laboratoire ont été testés en laboratoire individuellement. Ces différents essais seront précisés par la suite. La méthodologie de ces essais sera annexée à ce rapport.

Ainsi, le projet EmiBio a été découpé en 6 tâches :

- Tâche 1 : Pilotage
 - Pour assurer la continuité du projet, le respect des objectifs scientifiques et de valorisation, ainsi que le respect des délais.
- Tâche 2 : Évaluation des émissions de COV et COVm à l'échelle du matériau.
 - Pour quantifier les émissions en COV (intégrant les COVm) des différents matériaux présents dans les bâtiments « réels » étudiés en tâche 3, la méthodologie a consisté à évaluer d'une part les émissions des matériaux biosourcés en laboratoire sur des échantillons de tailles réduites selon les méthodes normalisées (Norme NF EN ISO 16000-9 et NF EN ISO 16000-10) [3], [4], et d'autre part, à identifier si des émissions spécifiques peuvent être associées aux matériaux biosourcés comparativement à des matériaux non biosourcés (reste de la paroi). Une chambre d'essai d'émissions (CLIMPAQ) a été utilisée pour caractériser les émissions des matériaux. Cette caractérisation a été réalisée à la température de 21 ± 3 °C, mais à deux humidités relatives différentes : 50 % selon les préconisations de norme NF ISO, et 85 % afin de pouvoir comparer les émissions évaluées à celles mesurées en tâche 4.
- Tâche 3 : Suivi des émissions de COV et COVm et des transferts hygrothermiques de 2 bâtiments réels comportant des matériaux biosourcés.
 - Pour évaluer les émissions dans l'air intérieur des matériaux des bâtiments étudiés par des mesures de COV en surface des différentes parois (murs, sol et plafond), mais également des mesures de transferts hygrothermiques dans la masse de la paroi. L'objectif a été d'évaluer si les émissions des principales surfaces mettant en œuvre les matériaux biosourcés étaient significativement différentes des autres surfaces et si des spécificités associées à l'utilisation de ce type de matériau pouvaient être identifiées ;
 - En parallèle, des mesures de caractérisation des concentrations de ces mêmes COV et COVm ont été menées pendant les campagnes, ainsi que des prélèvements microbiens dans l'air ;
 - Un diagnostic bâtiment a permis d'interpréter correctement ces mesures et d'établir un lien entre les mesures réalisées en surface de paroi et celles réalisées dans l'air ambiant.
- Tâche 4 : Étude des transferts hygrothermiques et des émissions des parois multicouches en cellule expérimentale.
 - Pour mesurer les émissions des parois contenant les matériaux biosourcés étudiés dans des ambiances maîtrisées, afin d'aider à l'interprétation des résultats des mesures *in situ* ;
 - Une comparaison avec une paroi composée uniquement de matériaux conventionnels a également été réalisée ;
 - Les émissions d'une des parois précédentes composée de matériaux biosourcés ont été comparées avec les émissions d'une paroi similaire mais dont la pose ne respectait pas les règles de l'art.
- Tâche 5 : Communication.
 - Pour diffuser les résultats de cette étude à la filière professionnelle.
- Tâche 6 : Rédaction et valorisation des résultats.
 - Participation à des colloques
 - Rédaction d'articles à comité de relecture ou lors de colloques

3. Description des bâtiments, des parois et des matériaux étudiés

3.1. Bâtiment 1 – bâtiment ancien rénové – la mairie de Moncheaux

3.1.1. Description générale du bâtiment

Les sites ont été choisis tous les deux dans les Hauts-de-France avec le même climat océanique. Ces bâtiments ont été soit rénovés, soit construits il y a plusieurs années. Ce choix est volontaire, car cela permet de suivre des bâtiments entrés dans une période de fonctionnement courant, en régime permanent – ce qui n’aurait pas été le cas sur deux bâtiments neufs ou fraîchement rénovés. Ces bâtiments ont été sélectionnés pour leur isolation bien sûr, mais également pour la volonté du maître d’ouvrage et du maître d’œuvre d’appliquer les règles de l’art lors des travaux (car l’équipe n’a pas pu le vérifier elle-même sur chantier), et l’intérêt des interlocuteurs pour le projet. En effet, les interventions étant contraignantes et répétitives, il n’a pas été aisé de trouver des volontaires.

Le premier site se décompose en deux bâtiments anciens, dont la structure est en briques lourdes (de 32 à 35cm d’épaisseur). Ils ont été totalement réhabilités (seuls les murs en brique ont été conservés) et sont reliés par une extension plus récente construite en structure légère en bois. Ce site est certifié HQE (Haute qualité environnementale). Les travaux se sont terminés en décembre 2013, et les nouveaux locaux ont été occupés dès janvier 2014. Les 3 bâtiments ont été isolés en parois verticales par de la laine de bois, par l’intérieur. Le bâtiment R+1 en briques claires (à gauche sur la photo) comprend le bureau du maire, des salles de réunion et d’archive. Le bâtiment central contient un open-space servant à la fois d’accueil du public et de bureaux pour les secrétaires de mairie tandis que le bâtiment en brique rouge est utilisé comme salle des mariages, servant aussi de salle pour les conseils municipaux. Habituellement, environ 10 personnes travaillent à la mairie. L’instrumentation a été réalisée dans la salle des mariages.



Figure 1 : Photos de la mairie de Moncheaux, vues extérieures. Gauche : photo du site. Source : site internet de la mairie de Moncheaux. Droite : bâtiment de la salle des mariages, vu de côté. Source : Cerema

Le bâtiment est décrit plus en détail dans le diagnostic de l’[Annexe 1](#).

3.1.2. Description des parois

La paroi décrite ci-après est celle de la salle des mariages, le processus de réhabilitation réalisé est celui d’une isolation thermique par l’intérieur. La paroi porteuse est constituée soit de briques, en partie courante de paroi, soit d’un remplissage bloc béton et brique en extérieur pour l’occultation d’une fenêtre, comme on peut le voir Figure 1, sur la droite du bâtiment. Un tasseau de bois est fixé sur le parpaing ou la brique, côté intérieur, pour assurer la présence d’une lame d’air d’environ 20 mm entre l’isolant et le mur porteur extérieur. L’isolant en laine de bois a une épaisseur totale de 180 mm posé en 2 couches (60 mm + 120 mm), un pare-vapeur a été placé après la première couche d’isolant de 60 mm côté intérieur. Le parement intérieur est composé de 2 plaques de plâtre de 18 mm d’épaisseur chacune. Le schéma de principe de constitution de la paroi est le suivant :

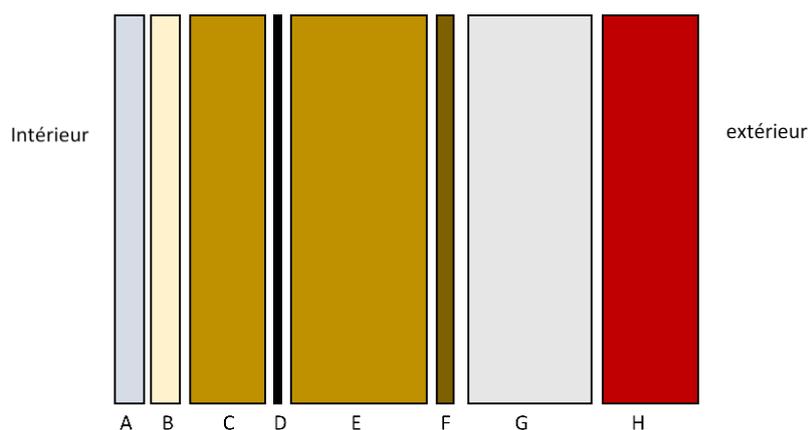


Figure 2 : Schéma de principe de la constitution de la paroi extérieure de la salle des mariages. Source : Université d'Artois

On trouve dans l'ordre, de l'intérieur vers l'extérieur :

- A- Prégyplac Siniat gris épaisseur 18 mm
- B- Prégyplac Siniat jaune épaisseur 18 mm
- C- Laine de bois épaisseur 60 mm
- D- Membrane d'étanchéité à l'air / pare-vapeur
- E- Laine de bois épaisseur 120 mm
- F- Tasseau épaisseur 20 mm
- G- Parpaing
- H- Brique

3.1.3. Description des matériaux

Le mur extérieur comprend deux parties : le mur support composé selon les endroits, d'un parpaing et d'un lit de briques ou entièrement en brique, et le doublage. Ce dernier comprend : deux plaques de plâtre de 18 mm de la marque SINIAT © de type haute densité ou résistant aux chocs ; pour des raisons d'approvisionnement, ces deux plaques ont été remplacées pour les essais en laboratoire (LTI Amiens) par des plaques standard de même épaisseur 18 mm. Les deux couches d'isolant sont constituées de panneaux flexibles de laine de bois « Isonat flex 55 » © réalisés à partir de pin Douglas, certifiés ACERMI © et PEFC (programme de reconnaissance des certifications forestières). L'écran d'étanchéité à l'air/pare-vapeur est un AEROVAP SD18+ ©, affiché avec une valeur de $S_d = 20$ m, et classé A+ dans le marquage des émissions dans l'air intérieur.

3.2. Bâtiment 2 – bâtiment récent conçu en matériaux biosourcés – groupe scolaire

3.2.1. Description générale du bâtiment

Le second site est un groupe scolaire livré en 2012 et situé dans le Pas-de-Calais (62) dans les Hauts-de-France. Il est composé d'un bâtiment de 1882 m² répartis sur un rez-de-chaussée et 1 étage (2ème étage réduit, accessible par l'extérieur et consacré aux 2 CTA). Il s'agit d'un bâtiment passif (certifié Passiv'Haus) en structure béton poteaux poutres positionnés au sein du bâtiment, tandis que l'enveloppe extérieure est non porteuse et est montée en caissons en bois reconstitué de 360 mm remplis de ouate de cellulose (bardage bois extérieur et BA13 en intérieur) et de triple vitrage PVC / aluminium.

Le rez-de-chaussée comprend 6 salles de classe et 3 ateliers / interclasses, une halte-garderie avec 2 salles d'activité, une cour intérieure, un local pour les enseignants, des sanitaires, 2 locaux techniques (électrique et de stockage des produits d'entretien), 2 locaux réservés au stockage du matériel scolaire, et enfin 2 vestiaires pour les personnels d'entretien.

Le 1^{er} étage comprend quant à lui 8 salles de classe et 4 ateliers / interclasses, une bibliothèque, des sanitaires, un local de stockage du matériel scolaire, une salle pour le matériel informatique et un local de stockage des produits d'entretien.

Enfin, le 2nd étage est en réalité un local technique uniquement accessible par l'extérieur au personnel autorisé et dédié aux 2 centrales de traitement d'air, à savoir une CTA double flux à roue GEA pour la partie école (salles de classes, etc.) et une double-flux à plaques dédiée aux sanitaires.

Ainsi, cet établissement peut accueillir au *maximum* 350 élèves (environ 25 élèves par classe). A ce jour, le groupe scolaire accueille environ 260 élèves et une vingtaine d'adultes (enseignants, personnel d'accompagnement), la capacité d'accueil ayant été légèrement surdimensionnée par rapport aux besoins actuels afin d'anticiper une potentielle augmentation des effectifs dans les années à venir.



Figure 3: Photos du groupe scolaire étudié, vues extérieures. Gauche : Vue de face. Droite : Vue de l'arrière (atelier 7/8 en surplomb) - Source : Cerema

Le bâtiment est décrit plus en détail dans le diagnostic de l'[Annexe 2](#).

3.2.2. Description des parois

Les parois extérieures de la pièce « Atelier 07/08 » sont constituées de caissons à ossature bois préfabriqués avec un remplissage de ouate de cellulose. En partie courante de paroi, le caisson est composé d'un bardage extérieur en bois supporté par un panneau de contreventement en fibre de bois, côté intérieur on trouve un panneau de particules multifonction de 10 mm. L'épaisseur de ouate de cellulose mise en œuvre est de 360 mm. Côté intérieur on trouve une importante lame d'air de 200 mm entre le caisson et le parement intérieur constitué d'une plaque de plâtre de 13 mm.

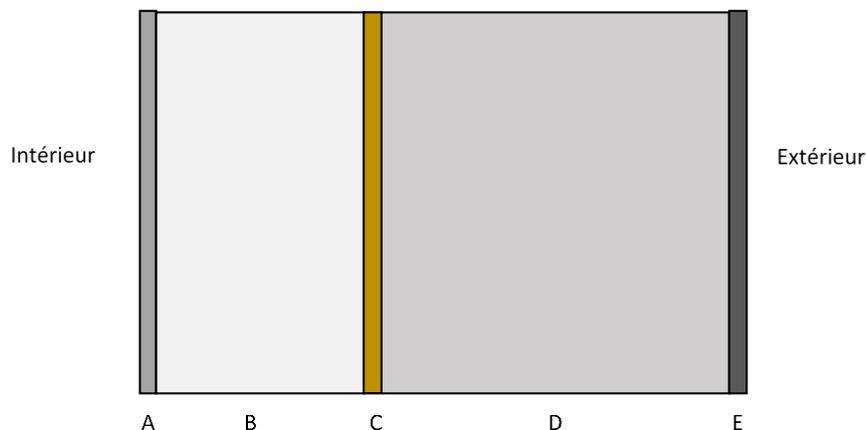


Figure 4: Schéma de principe de la constitution de la paroi extérieure de l'atelier. Source : Université d'Artois

On trouve dans l'ordre, de l'intérieur vers l'extérieur :

- A- Plaque de plâtre épaisseur 13 mm
- B- Lamelle d'air épaisseur 200 mm
- C- Panneau de particules MFP épaisseur 10 mm
- D- Remplissage ouate de cellulose épaisseur 360 mm
- E- Panneau bois DFP 16 mm + Bardage extérieur

3.2.3. Description des matériaux

L'ossature des caissons est constituée de poutrelles en « I » de type Finnjoist © avec âme OSB. Le panneau intérieur est un panneau de particules de bois multifonction (MFP) et celui à l'extérieur à base de fibres de bois permettant la diffusion de l'humidité (type DFP). Le remplissage est constitué par la ouate de cellulose de type UniverCell+© de SOPREMA, composée de fibres de cellulose en vrac obtenues à partir de papier de recyclage et dotée d'un label produit biosourcé. Sur chaque face latérale des caissons (dans le montant en « I ») est incorporé 30 mm de laine de roche de type Rockcalm ©.

4. Comparaison des émissions des matériaux seuls

Les différents matériaux intégrant les parois biosourcées sont présentés de manière détaillée dans le paragraphe 3.1.3 pour ce qui concerne la mairie de Moncheaux et dans le paragraphe 3.2.3 pour le groupe scolaire.

Les différents tableaux ci-dessous rassemblent les émissions des matériaux caractérisés aux différents niveaux d'humidité lorsqu'elles sont supérieures à $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène. Afin de comprendre les évolutions des émissions pour les différents COV, les émissions à 50 % d'HR après 28 jours d'exposition (selon la norme NF CEN ISO 16000-9 [3]) sont présentés dans les paragraphes 4.1 à 4.6. Le paragraphe 4.7 discute ensuite les résultats obtenus à 85 % d'HR après 3, 7, 14 et 28 jours.

Ainsi de manière détaillée les matériaux suivants ont été évalués :

- Mairie de Moncheaux :
 - Placoplâtre © (CLIMPAQ 50 L)
 - Pare-vapeur (CLIMPAQ 50 L)
 - Laine de bois : 60 mm et 120 mm (CLIMPAQ 50 L)
- Groupe scolaire
 - Placoplâtre © BA13 (CLIMPAQ 50 L)
 - Ouate de cellulose (CLIMPAQ 50 L)
 - OSB (CLIMPAQ 225 L)
 - Éléments de l'ossature bois qui relie deux panneaux OSB du caisson (CLIMPAQ 225 L)

Il est à noter que la plaque de placoplâtre BA13 est identique pour les deux bâtiments et par conséquent n'a été évaluée qu'une seule fois.

4.1. Émissions des plaques de placoplâtre

Le premier matériau étudié, la plaque de placoplâtre, est le matériau le moins émissif de tous les matériaux testés. Au total 60 COV ont quand même pu être identifiés et quantifiés dans les émissions mesurées à 50 % de HR (T0 + 28 jours ; première colonne), mais le taux d'émissions de la majorité de ces composés était inférieur à $0,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Par conséquent, le tableau 1 rassemble les émissions des 9 COV principalement émis par ce matériau.

On remarque que les émissions sont globalement très faibles : seul l' α -irone et le 4-carene présentent des taux d'émissions supérieurs à $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène dans les conditions requises par la norme NF CEN ISO 16000-9 (50 % HR) [3]. Les résultats présentés dans les 4 dernières colonnes seront discutés en section 4.7.

Tableau 1 : Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) du placoplâtre. Source : IMT Nord-Europe

Composé	T0+28-50 %	T0+3-85 %	T0+7-85 %	T0+14-85 %	T0+28-85 %	Ratio (T0+3-85 %/T0+28-50 %)
Formaldehyde	0.6	²	2.0	1.4	<LOD	3
Borinic Acid	0.9	1.6	1.2	1.0	0.1	2
α -Irone	2.4	4.0	2.8	2.9	0.3	2
4-Carene	1.4	2.8	1.9	1.8	0.3	2
Nonanal	<LOD	3.4	7.6	8.9	0.8	3
Octanal	0.1	2.2	1.8	1.4	0.1	22
Heptanal	0.1	1.3	0.7	0.3	<LOD	13
Hexylene Glycol	<LOD	2.3	0.3	<LOD	<LOD	2
Phenol + Hexanoic Acid	0.5	1.2	0.8	0.5	0.1	2
TVOC*	21	66	19	32	<LOD	3

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

4.2. Émissions du pare-vapeur

Pour ce matériau, les 43 COV avec les taux d'émissions les plus intenses ont été identifiés et quantifiés dans les émissions mesurées à 50 % de HR (T0 + 28 jours). Le tableau 2 rassemble les émissions des 5 COV principalement émis par le pare-vapeur.

On remarque que les émissions sont relativement faibles : le composé le plus émis est la propanone avec des taux d'émissions de l'ordre de 4 $\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène dans les conditions requises par la norme NF CEN ISO 16000-9 [3].

Tableau 2 : Taux d'émissions ($\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) du pare-vapeur. Source : IMT Nord-Europe

Composé	T0+28-50 %	T0+3-85 %	T0+7-85 %	T0+14-85 %	T0+28-85 %	Ratio (T0+3-85 %/T0+28-50 %)
Formaldehyde	1.7	1.6	1.4	-	1.9	-
Acetaldehyde	1.2	1.3	1.0	-	1.3	-
Propanone	3.8	3.2	4.2	-	4.1	-
o-Toulualdehyde	0.8	2.0	1.4	-	1.7	3
Benzoic Acid	1.0	1.4	1.3	-	1.2	-
TVOC*	26	65	46	-	10	3

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

4.3. Émissions de la laine de bois

Sur le site de Moncheaux, deux épaisseurs de laine de bois ont été intégrées aux murs intégrant l'isolant biosourcé. Les tableaux 3 et 4 rassemblent les émissions des 12 COV principalement émis par les laines de bois d'épaisseurs respectives de 60 et 120 mm mesurées à 50 %HR (T0 + 28 jours). Il apparaît que ce matériau est sensiblement plus émissif que les matériaux présentés précédemment.

Tableau 3 : Taux d'émissions ($\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) de la laine de bois (60mm). Source: IMT Nord-Europe

Composé	T0+28-50%	T0+3-85%	T0+7-85%	T0+14-85%	T0+28-85%	Ratio (T0+3-85%/T0+28-50%)
Formaldehyde	2.1	3.9	3.6	/	2.6	2
Acetaldehyde	0.8	4.6	5.1	/	2.8	6
Methyl Vinyl Ketone	2.9	9.5	8.2	/	1.4	3
Propanone	3.2	4.6	5.2	/	2.8	1
Methylglyoxal	20.0	45.4	51.8	/	44.4	2
Acetic Acid	33.0	98	84	/	200	3
Furfural	6.5	23.0	18.8	/	4.3	4
Methyl Furfural	1.0	7.9	6.1	/	1.1	8
D-Limonene	<LOD	4.7	6.5	/	2.9	5
Benzoic Acid	<LOD	4.4	NQ	/	0.9	4
1H-pyrrole-2-Carboxaldehyde	2.3	7.5	16.7	/	14.6	3
1,2-Propanediol Cyclic Carbonate	<LOD	1.1	1.2	/	0.9	1
TVOC*	28	154	319	/	214	6

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

Tableau 4 : Taux d'émissions ($\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) de la laine de bois (120mm). Source: IMT Nord-Europe

Composé	T0+28-50 %	T0+3-85 %	T0+7-85 %	T0+14-85 %	T0+28-85 %	Ratio (T0+3-85 %/T0+28-50 %)
Formaldehyde	1.3	2.4	2.3	2.1	1.8	2
Acetaldehyde	1.4	5.8	8.1	8.1	3.0	2
Methyl Vinyl Ketone	2.5	8.4	8.5	9.5	4.9	3
Propanone	2.4	8.6	10.6	9.3	8.5	4
Methylglyoxal	9.6	19.4	20.8	23.2	19.8	2
Acetic Acid	9.0	41.6	72	76	43	5
Furfural	2.9	18.8	19.8	91	8.2	6
Methyl Furfural	1.6	9.9	16.6	14.5	9.7	6
D-Limonene	<LOD	0.5	1.4	2.2	0.8	1
Benzoic Acid	0.1	0.7	1.3	1.7	NQ	7
1H-pyrrole-2-Carboxaldehyde	1.4	3.2	4.1	11.2	5.0	2
1,2-Propanediol Cyclic Carbonate	13.6	70	55	49	39	5
TVOC*	4	155	168	182	119	39

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

Les résultats obtenus montrent que les plus fortes émissions de COV de la laine de bois concernent les aldéhydes, les cétones et l'acide acétique, ce qui est cohérent avec l'étude de Pohleven et al.[5]. Les émissions d'aldéhydes des matériaux à base de bois proviennent principalement de la décomposition oxydative de la cellulose et de la lignine tandis que l'acide acétique peut être associé au clivage des groupes acétyles de l'hémicellulose lors de l'exposition à l'humidité [6].

4.4. Émissions de la ouate de cellulose

Le tableau 5 rassemble les émissions des 23 COV pour lesquels au moins une mesure supérieure à $1 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène a été quantifiée. Pour ce matériau, significativement plus émissif, les 47 COV avec les taux d'émissions les plus intenses ont été identifiés et quantifiés dans les émissions mesurées à 50 % HR (T0+28 jours).

Tableau 5 : Taux d'émissions ($\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) de la ouate de cellulose. Source: IMT Nord-Europe

Composé	T0+28-50 %	T0+3-85 %	T0+7-85 %	T0+14-85 %	T0+28-85 %	Ratio (T0+3-85 %/T0+28-50 %)
Propanone	<LOD	<LOD	1.0	1.7	7.2	-
Hexanal	0.8	2.9	1.7	0.7	0.9	4
Acetic Acid	0.9	2.4	1.4	1.6	0.5	3
Propylene Glycol	1.6	2.3	0.9	0.8	0.5	1
1-Pentanol	0.2	1.2	0.2	0.1	0.1	5
Toluene	0.6	1.4	0.2	0.1	0.1	3
1-Propoxy-2-propanol	0.1	1.2	<LOD	<LOD	<LOD	12
Pentanoic acid + 2-Heptanone	0.9	2.4	1.8	0.6	0.4	3
2-Butoxyethanol	0.3	3.6	3.3	0.3	<LOD	15
2-Ethyl-1-hexanol	0.1	15.4	3.7	0.6	0.2	124
2-Octenal	0.2	2.1	0.6	0.2	0.1	11
Undecane	0.1	1.4	0.5	0.04	0.1	14
Benzoic Acid	2.3	1.5	1.6	18.1	0.1	1
Butoxyethoxyethanol	0.6	3.5	3.1	2.5	1.9	6

Dodecane	0.1	1.3	<LOD	<LOD	<LOD	13
1-(2-Butoxy-1-methylethoxy)-2-propanol	0.2	5.2	3.4	2.0	1.3	26
Dibutyl Acetal Acetaldehyde	0.3	5.3	3.7	2.3	1.5	18
Tridecane	0.7	5.1	1.7	0.5	0.2	7
Tetradecane	12.1	20.4	9.0	4.9	2.8	2
Pentadecane	4.8	7.5	3.7		1.0	2
Alcane (isomère C ₁₅ H ₃₂)	10.5	12.8	7.4	4.1	2.5	1
Alcane (isomère C ₁₅ H ₃₂)	21	22	9.7	5.3	3.0	1
Hexadecane	10.6	12.2	6.6	3.4	2.0	1
TVOC*	109	255	131	70	34	2

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

Les émissions de la ouate de cellulose présentent plus d'espèces avec des taux d'émissions supérieurs à 1 µg.m⁻².h⁻¹ éq. toluène que ce qui a été mesuré antérieurement pour l'autre isolant biosourcé testé : la laine de bois. Les COV totaux sont évalués à plus de 100 µg.m⁻².h⁻¹ pour une humidité relative de 50 % avec comme COV principalement émis des alcanes « lourds » à partir de 13 atomes de carbone. Ces résultats semblent en accord avec les observations de Kelman et al.[7] , qui rapportent des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques lourds comme composés majoritairement émis à partir de la cellulose.

4.5. Émissions du panneau OSB

Pour le panneau OSB, les 45 COV avec les taux d'émissions les plus intenses ont été identifiés et quantifiés dans les émissions mesurées à 50 % HR (T0+28 jours) illustrant ainsi la diversité des espèces émises par ce type de matériau. Le tableau 6 rassemble les émissions des 26 COV pour lesquels au moins une mesure du taux d'émissions supérieure à 1 µg.m⁻².h⁻¹ éq. toluène a été quantifiée.

Tableau 6 : Taux d'émissions (µg.m⁻².h⁻¹ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) du panneau OSB. Source : IMT Nord-Europe

Composé	T0+28-50 %	T0+3-77 %	T0+7-77 %	T0+14-81 %	T0+28-75 %	Ratio (T0+3-85 %/T0+28-50 %)
Formaldehyde	4.0	6.2	3.8	4.6	3.6	2
Acetaldehyde	5.3	11.0	18.7	6.7	4.1	2
Propanone	28.7	96	109	42.3	13.4	3
Propanal	1.6	4.2	12.6	2.0	0.8	3
Crotanaldehyde	0.9	1.4	1.6	0.9	0.8	1
Butanal	0.9	28.0	85	12.8	3.5	31
Benzaldehyde	1.2	46.6	121	36.2	13.8	39
Pentanal	7.9	218	257	93	3.9	28
Methylglyoxal	4.4	123	128	57	17	28
Hexanal	32.1	908	1097	403	106	28
Toluene	0.6	1.3	1.8	NQ	NQ	2
2-Heptanone	0.8	0.5	5.1	1.9	0.6	1
1,3-Octenol	0.7	2.1	1.4	1.1	0.4	3
2-Nonanone	0.4	0.6	0.5	0.4	0.1	1
Borneol	1.6	1.8	1.2	0.7	0.4	1
Heptanal	1.6	5.4	5.3	2.0	0.6	3
a-Pinene	11.3	24.5	31.4	15.5	3.8	2
Octanal	7.1	9.9	9.9	5.3	2.1	1
3-Carene	8.8	12.9	15.8	12.6	6.1	1
o-Cymene	1.8	3.8	4.9	2.6	0.9	2

D-Limonene	2.2	2.8	3.4	3.0	1.9	1
2-Octenal	1.7	4.6	2.1	1.2	0.7	3
Nonanal	7.5	7.4	3.8	2.3	2.1	1
Verbenone	4.4	3.8	3.4	0.2	0.8	1
3-Carene-2,5-dione	4.8	2.9	1.3	0.7	0.2	1
Tetradecane	8.3	6.5	4.5	2.8	1.9	1
TVOC*	239	425	430	223	96	2

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

On peut remarquer que le panneau OSB se caractérise par de nombreux COV présentant des taux d'émissions significatifs et une émission totale relativement forte à 50 % d'humidité relative puisqu'elle atteint plus de 200 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène. Les 3 espèces principalement émises sont : hexanal, pronanone et α -pinène puis de nombreux autres COV avec une large majorité d'aldéhydes. On retrouve également plusieurs monoterpènes et leurs dérivés comme α -pinène, o-cymène et verbénone. Ces composés sont présents naturellement dans des plantes, et en particulier l' α -pinène est connue pour être fortement émise par certaines essences de bois [8][9]. Ces observations sont globalement en accord avec ce qui a été antérieurement observé dans d'autres études sur les panneaux OSB [10][11].

4.6. Émissions des éléments de l'ossature bois

Les éléments de l'ossature bois se caractérisent par une émission de COV forte et typique du bois, comme observé pour le panneau OSB. Pour l'ossature de bois, les 41 COV avec les taux d'émissions les plus intenses ont été identifiés et quantifiés dans les émissions mesurées à 50 % HR (T0+28 jours). Le tableau 7 rassemble les émissions des 34 COV pour lesquels au moins une mesure supérieure à 1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène a été quantifiée.

Tableau 7: Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) de l'ossature bois. Source : IMT Nord-Europe

Composé	T0+28-50 %	T0+3-85 %	T0+7-85 %	T0+14-85 %	T0+28-85 %	Ratio (T0+3-85 %/T0+28-50 %)
Formaldehyde	16.7	22.5	23.5	27.4	28.5	1
Acetaldehyde	9.1	15.2	14.6	27.9	14.0	2
Propanone	45.6	99	98	119	102	2
Propanal	0.6	5.8	4.9	7.8	3.2	10
Methyl Vinyl Ketone	3.5	6.6	8.0	9.1	5.4	2
Butanal	2.1	5.5	5.1	6.1	4.0	3
Benzaldehyde	3.4	15.4	16.9	18.7	16.2	5
Pentanal	10.0	27.8	25.5	31.5	20.5	3
Methylglyoxal	4.8	12.6	12.3	15.9	11.1	3
Hexanal	29.0	82	78	103	70	3
2,3-Butanedione	<LOD	1.3	1.4	1.1	<LOD	1
Acetic Acid	4.7	23.0	9.7	6.9	6.2	5
Benzene + 1-Butanol	0.3	1.2	1.2	NQ	6.0	4
Heptane	3.4	1.6	1.6	2.9	1.4	0.5
Propanoic Acid	2.4	7.8	3.7	2.3	3.8	3
2-Pentanal	0.3	3.2	3.3	3.3	<LOD	11
1-Pentanol	2.5	17.9	18.3	15.1	12.8	7
Toluene	3.8	4.3	6.2	9.9	6.6	1
Furfural	8.0	14.5	17.6	18.8	13.9	2
Octane	0.4	2.5	1.7	1.1	0.8	5
2-Hexenal	0.4	1.5	1.5	1.6	1.0	4
Butyrolactone	0.6	1.8	1.2	2.2	1.9	3
Heptanal	2.4	5.0	4.9	5.4	4.4	2
2-Heptanone	1.3	3.8	3.5	0.1	2.9	3

a-Pinene + Benzaldehyde	39.7	42.1	53	50	40.5	1
o-Cymene	6.9	12.4	12.2	16.9	10.0	2
D-Limonene	4.4	4.7	4.5	5.3	4.8	1
2-Octenal	1.1	3.8	4.3	4.8	3.4	4
Nonanal	4.9	6.8	6.7	7.0	6.2	1
a-Camphenol	0.5	1.3	1.0	1.5	1.2	3
Decanal	1.2	2.1	1.7	4.5	2.8	2
Verbenone	1.7	4.2	3.9	4.8	4.2	2
2-Decenal	1.0	2.2	2.3	2.5	1.8	2
Nonanoic Acid	1.6	3.7	1.7	4.5	2.8	2
TVOC*	184	341	335	404	306	2

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

On note que l'ossature bois se caractérise par de nombreux COV avec des taux d'émissions $>1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène et une émission de COVT relativement forte à 50 % d'humidité relative puisqu'elle atteint près de $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène. Notamment 5 espèces présentent des taux d'émissions importants ($>10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) : propanone, α -pinène coélués avec le benzaldéhyde, hexanal, formaldéhyde et pentanal. Ainsi il s'agit globalement de nombreuses espèces oxygénées, en particulier des aldéhydes. On retrouve également plusieurs monoterpènes et leurs dérivés comme a-pinène, o-cymène, camphenol et verbénone. Ces composés sont présents naturellement dans des plantes, et en particulier l'a-pinène est une espèce qui est connue pour être fortement émise par certaines essences de bois [8][9].

4.7. Influence de l'humidité relative sur les émissions des différents matériaux testés

Les taux d'émissions des différents COV ont été amplifiés de manière quasi-systématique lorsqu'une augmentation de l'humidité de 50 à environ 85 % a été imposée, comme cela est montré dans les tableaux 1 à 7. Les ratios d'émissions calculés entre les mesures réalisées à 50 % HR et après 3 jours à 85 % HR (dernière colonne des tableaux), indiquent ainsi l'évolution immédiate des émissions entre ces deux conditions d'humidité relative (HR). On remarque que les émissions restent stables ou augmentent globalement, à l'exception de l'heptane (tableau 7) pour qui les émissions diminuent. Les taux d'émissions de certaines espèces varient très largement après l'augmentation de l'humidité relative. Ainsi on voit l'émission multipliée par 124 fois pour le 2-éthyl-1-hexanol émis par la ouate de cellulose (tableau 5). En général, les ratios les plus élevés sont observés pour des espèces oxygénées. En effet, lorsque la teneur en eau de l'air est plus élevée, les molécules d'eau entrent en compétition avec les COV, en particulier les espèces les plus hydrophiles comme les aldéhydes, pour occuper les sites adsorbants actifs à la surface du matériau, ce qui entraîne des taux d'émissions de COV plus élevés dans un premier temps [12]. Cependant, la plupart des émissions d'aldéhydes ont été mesurées comme étant maximales après 3 jours d'émissions à 85 % HR et ont ensuite diminué progressivement pendant 28 jours. Cela peut s'expliquer par l'atteinte d'un nouveau régime d'équilibre à cette nouvelle humidité relative et/ou par l'épuisement des COV du matériau après une exposition prolongée à l'humidité [13].

Ce phénomène est particulièrement important à prendre en compte dans cette étude. En effet, sur site les conditions d'humidité sont relativement médianes avec des taux d'humidité relative de l'ordre de 50 % alors que les essais conduits dans les enceintes climatiques (paragraphe 5) tendent à imposer des humidités relatives plus élevées, de l'ordre de 70 %.

5. Emissions à l'échelle de la paroi en fonction des conditions hygrothermiques - croisement avec les émissions des matériaux

5.1. Présentation des différentes parois testées

L'objectif de cette tâche est d'étudier les émissions de COV et mCOV à l'échelle d'une paroi en fonction des conditions hygrothermiques contrôlées en laboratoire. Les tests ont été réalisés dans le laboratoire LTI de l'Université de Picardie Jules Verne, qui possède des cellules régulées en température et humidité à l'échelle 1. Cette tâche fait intervenir aussi l'Armines pour les mesures des émissions. Elle permettra de reproduire les parois réelles des bâtiments étudiés et de les tester en laboratoire en conditions climatiques maîtrisées. La reproduction des parois est détaillée en [Annexe 3](#).

5.1.1. Choix des matériaux et reproduction des parois étudiées

La dénomination des différentes parois testées en laboratoire est reprise dans le tableau 8 ci-dessous :

Tableau 8: Synthèse des murs étudiés. Source: Université de Picardie

Nom	Conditions de test
M_norm	Mur de Moncheaux sous des conditions hivernales ; conditions visées : 12 °C et 65 % d'humidité relative pour les conditions extérieures et 22 °C et 70 % HR pour les conditions intérieures.
M_défav	Mur de Moncheaux identique sous des conditions plus défavorables : <ul style="list-style-type: none">• Mise en conditionnement des 2 bandes centrales de 60 cm de laine de bois : humidification avec pulvérisation d'eau,• Mise en place dans la chambre climatique à 22 °C, 80 % HR pendant une semaine avant de faire le test.
M_dégrad	Mur de Moncheaux dégradé / accidentel / mal monté : pas de pare-vapeur (PV), simulation de fuite d'eau, une seule plaque de plâtre.
M_conv	Mur conventionnel avec isolant en laine de verre semi rigide avec Kraft.
M_GS	Parois du site du groupe scolaire - pas de suivi des évolutions hygrothermiques dans la paroi.

L'objectif a été de reproduire des parois à l'identique de celles des bâtiments testés. Pour le premier site de Moncheaux, il s'agit d'un doublage à base de laine de bois avec pare-vapeur sur mur en brique. Les panneaux de laine de bois sont de la même marque et mêmes épaisseurs que ceux mis en place sur site. Seul le parement en plaques de plâtre n'a pu être reproduit avec des plaques identiques ; les deux plaques, de qualités différentes sur site, ont dû être remplacées par des plaques standards de même épaisseur (BA 18), en raison de la difficulté d'identification et d'approvisionnement. Le pare-vapeur est identique à celui du site et les montants sont en bois de charpente sapin pour la partie en laine de bois de 120 mm, et constitués de rails métalliques standards de 70 mm pour la partie en laine de bois de 60 mm. Le descriptif de la reproduction du mur (M_norm) ainsi que des autres murs, est détaillé dans [l'Annexe 3](#). Différentes configurations ont été testées et comparées à une rénovation plus conventionnelle. Pour le mur du groupe scolaire, deux éléments de paroi identiques à ceux du site ont été fournis par le fabricant.

5.1.2. Equipements et conditions d'essai

Les dimensions du mur sont d'environ 1,9 m de large sur 2 m de haut, ce qui permet d'offrir une surface exposée aux conditions climatiques des deux caissons de 1,6 m x 1,6 m sur chaque face. Toute la partie périphérique du mur est isolée pour éviter les fuites latérales de chaleur et d'humidité à l'aide d'un film étanche et d'une laine de 20 cm d'épaisseur (). Les capteurs positionnés durant la fabrication sont identiques à ceux utilisés pour les mesures in-situ : thermo-hygromètres de type Vaisala HMP60. Leurs positions sont indiquées dans la suite pour chaque configuration.

Les conditions visées pour les essais sont celles correspondant à une période hivernale dans le Nord de la France (12 °C et 65 % d'humidité relative) et une pièce intérieure occupée (22 °C et 70 % HR), ce qui, en régime établi, conduit à des flux de chaleur et d'humidité de l'ambiance intérieure vers l'extérieur. Les gradients de température et de pression de vapeur prévus entre l'ambiance intérieure et l'ambiance extérieure sont alors respectivement de 10 °C et 859 Pa.



Figure 5: Mur de Moncheaux reproduits en laboratoire et les deux caissons climatiques. Source : Université de Picardie

Dans cette étude, les murs ont été soumis à des conditions stables et maintenus dans les caissons climatiques pendant plusieurs semaines, de façon à tendre vers un régime de transferts établis, avant les opérations de prélèvement et de mesure d'émissions de polluants effectuées par l'IMT Nord-Europe et l'IMT Atlantique.

5.1.3. Comportement hygrothermique des murs étudiés

L'évolution détaillée des paramètres (température, humidité relative, pression de vapeur d'eau, humidité absolue) en fonction du temps des différents points de mesure dans les murs est présentée dans l'Annexe 3. Toutes les valeurs ont été enregistrées après environ 1 mois de mise en régime.

5.1.3.1. Comportement hygrothermique des murs M_norm et M_défav

La figure 6 représente les conditions hygrothermiques des tests réalisés. Les valeurs moyennes de T (température), HR (humidité relative), Pv (pression de vapeur d'eau) et HA (humidité absolue) pour chaque point de mesure des murs M-norm et M_défav sont présentées dans les tableaux 9 et 10 respectivement. Il est noté qu'en raison des performances des installations (zone de régulation et puissance des caissons climatiques), les gradients de température et de pression de vapeur entre les conditions intérieures et extérieures obtenues sont de 8.4 °C/904.3 Pa pour le mur M-norm et 4.2 °C/498.1 Pa pour le mur M-défav (les valeurs de consigne souhaitées initialement étant 10 °C/ 859 Pa).

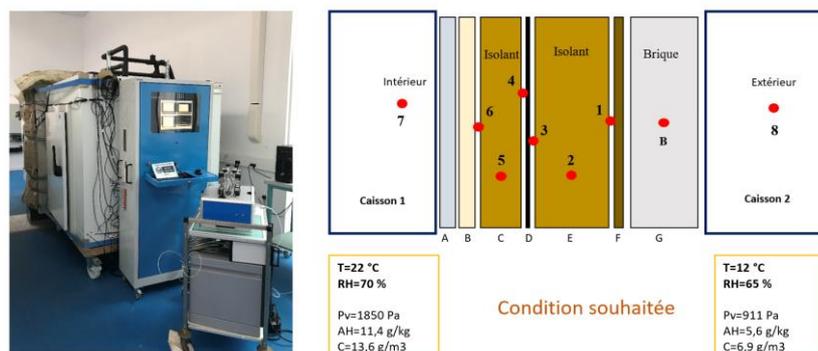


Figure 6: Conditions des tests hygrothermiques des murs M_norm et M_défav. Source : Université de Picardie

Conformément aux prévisions théoriques, les résultats expérimentaux obtenus montrent une chute importante de température dans l'isolant (7.4 °C pour le mur M_norm et 2.8 °C pour le mur M_défav) confirmant le rôle de l'isolant pour limiter les déperditions de la chaleur.

Il est noté que les murs ont été testés alors que la partie porteuse en brique (initialement humide) n'a pas encore atteint son état d'équilibre hygrothermique (temps extrêmement long de stabilisation compte tenu de la planification des essais), ce qui impacte en partie le comportement hygrothermique du mur dans son ensemble. Par exemple, la température au milieu de la brique est plus faible que T1 et Text (mur M_norm, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), ce qui peut s'expliquer par le phénomène endothermique non complètement abouti de désorption de la brique.

Considérant la pression de vapeur donnée par les capteurs 4 et 3, la pression chute de 1643.1 Pa à 1027.1 Pa (soit $\Delta P_v = 616$ Pa) pour le mur M_norm et de 1440,4 à 1138,7 (soit $\Delta P_v = 301,7$ Pa) pour le mur M_défav, confirmant ainsi le rôle important du pare vapeur pour minimiser le risque de condensation dans la paroi. On peut remarquer toutefois pour les deux murs, une faible variation de la pression de vapeur d'eau dans la première couche d'isolant avant le pare-vapeur (isolant C : capteurs 6, 5 et 4), phénomène pouvant être attribué à la forte hygroscopicité de la laine de bois.

Tableau 9: T, HR, Pv et HA moyennes pour chaque point de mesure du mur M_norm. Source : Université de Picardie

	Point mesure	Tin	HR	Pv	HA
		°C	-	Pa	gv/kgas
	Int	23,5	0,71	2056,0	12,9
Isolant C	6	21,3	0,66	1667,8	10,4
	5	20,7	0,67	1636,0	10,2
	4	19,9	0,70	1643,1	10,3
Isolant E	3	19,3	0,46	1027,1	6,4
	2	17,5	0,51	1024,7	6,4
	1	13,9	0,67	1064,0	6,6
Brique	B	13,3	0,77	1173,0	7,3
	Ext	15,1	0,67	1151,7	7,2

Tableau 10: T, HR, Pv et HA moyennes pour chaque point de mesure du mur M_norm. Source : Université de Picardie

	Point mesure	Tin	HR	Pv	HA
		°C	-	Pa	gv/kgas
	Int	19,8	0,69	1586,2	9,9
Isolant C	6	18,5	0,69	1474,1	9,2
	5	18,3	0,70	1466,9	9,1
	4	18,4	0,68	1440,4	9,0
Isolant E	3	18,7	0,53	1138,7	7,1
	2	17,6	0,56	1130,6	7,0
	1	15,7	0,65	1156,6	7,2
Brique	B	15,0	0,73	1240,7	7,7
	Ext	15,6	0,61	1088,1	6,8

5.1.3.2. Comportement hygrothermique du mur M_dégrad

Les positions des capteurs, les conditions des tests et les résultats obtenus sont présentés figure 7 et tableau 11.

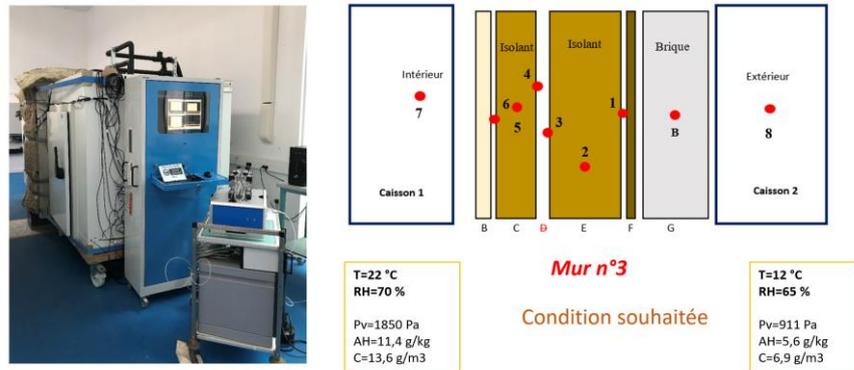


Figure 7: Conditions des tests hygrothermiques du mur M_dégrad. Source : Université de Picardie

On note une différence de température et de pression de vapeur entre les conditions intérieures et extérieures de 9.2 °C/734.7 Pa (comparativement aux valeurs de consigne souhaitées de 10 °C/859 Pa) montrant ici une assez bonne réactivité des caissons climatiques.

Tableau 11: T, HR, Pv et HA moyennes pour chaque point de mesure du mur M_dégrad. Source : Université de Picardie

	Point mesure	Tin	HR	Pv	HA
		°C	-	Pa	gv/kgas
	Int	21,8	0,67	1757,2	11,0
Isolant C	6	21,2	0,68	1707,4	10,7
	5	20,6	0,71	1705,3	10,7
	4	20,0	0,70	1640,0	10,2
Isolant E	3	19,4	0,73	1653,0	10,3
	2	18,8	0,71	1533,5	9,6
	1	15,9	0,81	1455,9	9,1
Brique	B	13,5	0,78	1203,6	7,5
	Ext	12,6	0,70	1022,5	6,3

Comme précédemment, les résultats obtenus par cet essai confirment une chute importante de température dans l'isolant (de 21,2 °C à 15,9 °C soit une chute de 5.3 °C). En revanche, comme pour cet essai le pare-vapeur (élément D des murs M_norm et M_défav) a été enlevé, les valeurs enregistrées par les capteurs 3 et 4 sont voisines pour la température et l'humidité.

5.1.3.3. Comportement hygrothermique du mur conventionnel M_conv

Dans cet essai, la structure en brique des trois murs précédents a été gardée et le doublage est composé d'une lame d'air de 5 cm, d'une laine minérale de 120 mm avec kraft et un parement en simple plaque de plâtre de 13 mm (BA13).

Les figure 8 et tableau 12 donnent les positions des capteurs, les conditions des tests et les résultats expérimentaux obtenus.

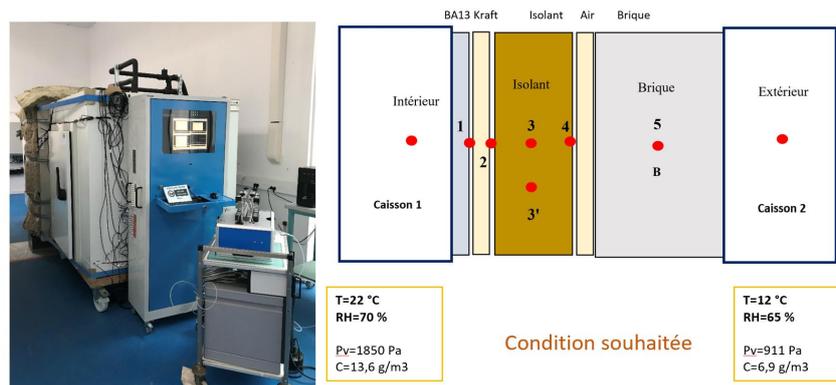


Figure 8: Conditions des tests hygrothermiques du mur M_{conv} . Source : Université de Picardie

Pour cet essai, les conditions dans les deux caissons ont permis de réaliser un gradient de température et de pression de vapeur d'eau très proche des conditions souhaitées. Les températures et pressions de vapeur d'eau intérieures et extérieures moyennes sont 21,7 °C/1709,5 Pa et 12,8 °C/917,3 Pa (comparées aux valeurs de consigne définies 22 °C/1850 Pa et 12 °C/911 Pa).

Tableau 12: T , HR , P_v et HA moyennes pour chaque point de mesure du mur M_{conv} . Source : Université de Picardie

Point mesure	T_{in}	HR	P_v	HA
	°C	-	Pa	gv/kgas
Int	21,7	0,66	1709,5	10,7
1	21,7	0,66	1722,1	10,8
2	22,0	0,59	1578,1	9,8
3	20,4	0,63	1525,5	9,5
4	15,4	0,86	1520,7	9,5
B	14,0	0,79	1279,5	8,0
Ext	12,8	0,62	917,3	5,7

Les résultats obtenus ont confirmé le rôle de l'isolant pour assurer la performance thermique (chute importante de température entre deux points 2 et 4) et du pare-vapeur (Kraft) pour éviter le risque de condensation (chute importante de pression de vapeur d'eau entre les deux points 1 et 2). Il est intéressant de noter une chute de pression de vapeur d'eau de 144 Pa, comparativement à celle de 570.3 Pa causée par le pare-vapeur dans le mur M_{norm} .

5.1.3.4. Comportement hygrothermique du mur du groupe scolaire M_{GS}

Les tests prévus pour les éléments de paroi identiques à ceux posés sur le site du groupe scolaire n'ont pu être réalisés dans la configuration des caissons climatiques du laboratoire en raison de défauts constatés sur les éléments fournis. Néanmoins chacun des constituants a fait l'objet de l'étude d'émissions de COV et COVm, détaillé en paragraphe 4.

5.1.4. Conclusion

Ces études expérimentales ont permis d'analyser le comportement hygrothermique de murs, en partant de la composition relevée sur site réel, dans des conditions de température et d'humidité maîtrisées et stabilisées. Les reproductions de variantes pour la constitution du mur, malfaçon (absence de pare-vapeur) ou pour les conditions de mise en œuvre (par exemple : isolant stocké dans un milieu humide) ont permis d'approfondir l'étude menée in-situ et de comparer les résultats. D'une manière générale, on note l'importance de la présence et de la qualité du pare-vapeur dans la paroi pour limiter la progression de l'humidité dans l'isolant.

5.2. Mesures au niveau des parois: caractérisation des émissions et développement de micro-organismes

5.2.1. Mur conventionnel

5.2.1.1. Caractérisation du développement de micro-organismes dans les différentes parois

Afin de caractériser la potentialité des isolants biosourcés composés de fibres de bois à être le siège d'un développement microbien et plus spécifiquement fongiques, différentes configurations de parois ont été installées dans les cellules climatiques. Les souches fongiques retenues pour l'étude ont été *Aspergillus niger* au départ puis l'inoculum a été complété de 2 souches de *Penicillium* isolés du matériau biosourcé. 4 configurations ont été testées, à savoir : (i) une paroi représentative d'un mur de la mairie de Moncheaux avec un assemblage dans les règles de l'art (mur M_norm); (II) une paroi de même constitution mais dont l'isolant biosourcée aura été préconditionné dans une ambiance de forte humidité relative avant ensemencement et mise en place dans le mur (mur M_défav) ; (iii) une paroi constituée d'un isolant biosourcé ayant subi une forte humidification type "remontée capillaire d'eau" avant ensemencement et mise en place (mur M_dégrad) ; (iv) une paroi conventionnelle contenant de la laine de verre à la place du matériau biosourcé. Les taux d'humidité dans le matériau avant et après les 4 semaines d'expérience ont été mesurés par la méthode Karl Fischer (tableau 13). Afin de déterminer la quantité de spores fongiques déposées par unité de surface sur l'isolant, des filtres stériles ont été déposés sur le matériau au moment de l'ensemencement puis les spores ont été comptées, après extraction, par la méthode des unités formant colonie (UFC). Après les 4 semaines "d'incubation" dans les cellules climatiques des échantillons de l'isolant ont été prélevés et la concentration de micro-organismes mesurée par la méthode des UFC après extraction par 20 mL de de solution d'extraction pendant 2 h sous agitation. Les résultats obtenus pour les différentes campagnes sont regroupés dans le tableau 13. A partir des résultats obtenus il est possible de proposer 2 conclusions principales :

- Le taux d'humidité dans le matériau influence la survie des micro-organismes. En effet les 3 premières conditions expérimentales correspondent à une augmentation du taux d'humidité dans l'isolant biosourcé. Dans le mur M_norm l'isolant présente un faible taux d'humidité car la construction du mur a été réalisée dans les règles de l'art et de ce fait les spores déposées ne présentent pas de développement. Il est même possible de noter une mortalité des spores qui peut être expliquée par le fait que ces dernières rencontrent des conditions favorables (substrat, nutriments, température humidité) pour leur germination mais pas suffisante pour soutenir un développement par mise en place d'un mycélium et la production de nouvelles spores. Par contre dans les conditions M_défav et M_dégrad, le taux d'humidité dans l'isolant biosourcé est de plus en plus favorable et permet donc respectivement une faible et une forte croissance fongique. Enfin, il apparaît clairement que l'isolant à base de fibre de verre ne permet pas le développement fongique car il n'a pas la capacité de retenir l'humidité et qu'il n'est pas source de nutriment ni de substrats indispensables à la croissance fongique.
- Il existe une différence de sensibilité des espèces fongiques à la présence d'humidité et donc à leur croissance (évolution du ratio Asp/Pen). Pour les conditions M_défav et M_dégrad, la comparaison des ratios entre les spores d'*Aspergillus* et de *Penicillium* déposés et ceux après 4 semaines d'incubation montre que le genre *Penicillium* s'adapte préférentiellement sur l'isolant biosourcé constitué de fibres de bois. Ce résultat peut être expliqué par le fait que les souches de *Penicillium* utilisées dans cette étude proviennent d'un isolat obtenu à partir de l'isolant biosourcé.

Tableau 13: Résultats des différentes campagnes expérimentales réalisées dans des conditions contrôlées (Asp : *Aspergillus niger* ; Pen : *Penicillium sp.*). Source : IMT Atlantique

	Taux humidité (%) dans l'isolant		Ensemencement		Concentration microbienne T4 semaines						
	T0	T4 semaines	Spores UFC/cm ²	Ratio Asp/Pen	Aspergillus (UFC/cm ²)		Penicillium (UFC/cm ²)		Microorganismes totaux (UFC/cm ²)		Ratio Asp/Pen
Mur_M_norm	nd	9,5 ± 1,1	712 ± 68		< LD		< LD		< LD		
Mur_M_défav	11,38 ± 0,72	10,59 ± 0,57	1010 ± 435	5,35	2,4E+03 ± 1,5E+03		8,8E+02 ± 4,8E+02		3,3E+03 ± 1,8E+03		3,4
Mur_M_dégrad	57,05 ± 2,75	17,22 ± 4,49	5654 ± 1875	11	4,3E+02 ± 6,0E+02		2,1E+06 ± 3,2E+06		2,1E+06 ± 3,2E+06		0,013
Mur_conv	3,05 ± 0,01	2,25 ± 0,003	6700 ± 4100	0,25	1,22E+02 ± 6,40E+01		1,27E+03 ± 8,95E+02		1,40E+03 ± 9,19E+02		0,13

Les valeurs guides du développement microbien sont détaillées en [Annexe 4](#).

5.2.1.2. Quantification des émissions de différentes parois : parties « ensemencées » et « non-ensemencées »

Comme indiqué dans le paragraphe 5.1.1, le mur conventionnel a été ensemencé sur la partie basse de sa structure. Des prélèvements ont été réalisés à partir de la mise en place de la paroi et ensemencement de la partie basse qui est considérée comme T0. Ainsi à T0+7 jours, T0+14 jours et T0+27 jours, des mesures d'émissions ont été menées sur la partie non-ensemencée (repérée « NE ») et sur la partie du mur ensemencée (repérée « E »). La tableau 14 regroupe l'ensemble des COV mesurés lors des différentes expérimentations.

Au travers des résultats obtenus, il est possible de constater que les espèces émises sur la partie « ensemencée » et sur la partie « non-ensemencée » du mur sont les mêmes. Cependant, les taux d'émissions mesurés sont significativement différents pour ces deux parties même si les ordres de grandeur sont identiques et le classement des espèces majoritaires est voisin. Ainsi, les espèces majoritaires sont le 5-méthyl-furfural, la propanone, l'acétaldéhyde et le formaldéhyde. Pour ce qui concerne l'évolution des émissions, on constate une augmentation des taux d'émissions entre T0+7 jours et T0+14 jours et une diminution entre T0+14 jours et T0+ 27 jours et ce de manière assez comparable pour les deux parties de la paroi.

Par ailleurs, il est possible de constater qu'il n'y a pas d'évolution très différente des concentrations ou de la nature des COV émis entre les deux parties du mur. Cette observation est en accord avec le diagnostic de développement fongique qui n'a pas mis en évidence l'apparition de μ -organismes.

Tableau 14: Evolution temporelle des taux émissions d'émissions ($\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène) en en COV du Mur_Conventionnel (Mur_conv). Source : IMT Nord-Europe

	J+7_NE*	J+14_NE	J+27_NE	J+7_E**	J+14_E	J+27_E
Formaldéhyde	10.4	17.2	12.1	4.2	16.4	4.3
Acetaldehyde	12.6	10.5	6.6	3.9	7.4	1.9
Propanone	35.7	88.1	37.6	14.8	52.7	5.0
Crotanaldehyde	14.3	24.4	10.5	3.8	8.9	1.5
Methyl ethyl Ketone (MEK)	1.5	2.4	1.7	0.5	2.0	0.7
Hexanal	2.2	4.1	1.6	2.2	6.1	1.3
2,5-Dimethylbenzaldehyde	8.3	8.3	0.5	6.6	15.1	1.0
Isopropyl alcohol	2.5	1.8	0.6	1.8	1.4	0.9
Benzene+1-butanol	1.1	1.0	1.2	2.3	2.0	3.0
2-Pentanone	0.7	2.1	2.1	1.9	4.6	3.5
1,2-Ethanediol	3.0	1.5	1.7	2.2	2.3	3.3
Propylene glycol	56.8	4.6	3.7	5.2	6.5	3.2
Toluene	0.6	1.5	2.3	0.7	1.8	1.1
Hexanal	0.4	0.5	0.5	0.4	1.1	0.4
2-Hexanone	0.3	1.5	0.8	0.7	2.1	0.7
Furfural	2.8	3.8	2.9	3.1	4.0	1.3
Hexamethyl cyclotrisiloxane	0.9	0.9	0.7	0.9	1.1	0.9
2-Furanemehanol	0.9	1.1	0.4	1.2	2.0	0.2
Ethylbenzene	0.4	0.8	0.6	0.4	1.0	0.3
1-Hexanol	0.7	1.0	0.5	0.8	1.1	0.2
m+p-Xylene	1.3	2.8	2.3	1.6	3.5	0.9
2-Heptanone	0.6	2.2	1.9	1.2	4.5	1.1
Acetylfuran	2.3	3.3	1.8	2.7	3.7	0.7
2-Butoxyethanol	0.6	1.6	1.1	0.7	1.8	0.5

Hexylene glycol	0.8	2.0	1.3	1.1	2.6	0.4
Furfural, 5-methyl-	54.1	81.2	30.2	58.2	62.7	3.9
1,2,4-trimethylbenzene	0.6	2.4	3.5	1.1	3.7	1.5
2-Ethyl-1-hexanol	1.3	2.4	1.9	1.6	3.1	0.9
D-Limonene	1.6	2.2	1.8	2.2	3.2	1.1
Nonanal	0.9	1.8	1.3	0.4	0.9	<LOD
Undecane	0.3	0.6	0.3	3.1	3.0	<LOD
1-Bromopentadecane	0.9	2.1	1.9	1.6	4.1	0.8
TVOC*	73.9	154.5	94.9	112.6	209.9	15.2

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

5.2.2. Mur biosourcé laine de bois sous différentes conditions hygrothermiques

5.2.2.1. Quantification des émissions de la paroi biosourcée fibre de bois dans des conditions hygrothermiques « normales »

Méthodologie d'évaluation des taux émissions

Les émissions de COV ont été mesurées à partir de la paroi biosourcée mise dans des conditions hygrothermiques normales (mur M_norm). Deux cellules FLECs ont été installées sur les parties haute et basse du mur. Un prélèvement a été pris après 24 heures de la partie haute (NE_Haute_J+1) et de la partie basse (NE_Basse_J+1). Les FLECs ont ensuite été désinstallées et la laine de bois de la partie haute de la paroi a étéensemencée. La paroi a été maintenue sous un flux hygrothermique normal (paragraphe 5.1) pendant 28 jours. Après cette période, les FLECs ont été réinstallées aux mêmes endroits et un autre prélèvement a été pris de la partie basse non ensemencée (NE_Basse_J+28) et de la partie haute ensemencée (E_haute_J+28) après 24 heures de la mise en place des cellules FLECs.

Résultats

Pour caractériser l'homogénéité de l'émission de la même surface, des mesures de COV des mêmes parois à deux endroits différents (NE_Haute_J+1 et NE_Basse_J+1) ont été faites. Comme le montre le tableau 15, l'émission de quelques COV tels que l'éthylène glycol, le propylène glycol et le furfural était comparable avec une différence relative de moins de 20 % alors que pour les autres composés tels que la propanone, l'acétaldéhyde et le formaldéhyde, une différence significative a été observée entre les deux endroits d'une même surface. Comme vu dans le paragraphe 5.2.1.1, cette différence ne s'explique pas par un développement microbien. Globalement, les émissions sont beaucoup plus variables au début de la mise en place des cellules FLECs (J+1) qu'après 28 jours. Par conséquent, l'inhomogénéité de la surface doit être prise en compte lors de l'interprétation des résultats obtenus en particulier quand les mesures sont réalisées très rapidement (dans ce cas après 24 heures) après la mise en place des dispositifs de mesure.

Lors de la comparaison des émissions de COV prélevées au même endroit après 28 jours et après 1 jour de mise en place du mur sous des conditions hygrothermiques normales (NE_Basse_J+1 et NE_Basse_J+28), on observe globalement deux tendances. Pour certains COVs le taux d'émissions diminue, tandis que pour d'autres il augmente au cours du temps. Les taux d'émissions de la majorité des composés (tels que l'éthylène glycol, le propylène glycol et le formaldéhyde) ont diminué en raison de la longue exposition du mur à l'humidité relative qui peut conduire à l'épuisement du COV de la matière ou à la stabilisation de leurs émissions [13]. Cependant, pour certains aldéhydes (furfural et hexanal) et certaines cétones (méthyl vinyl cétone et méthyl éthyl cétone), les taux d'émissions ont augmenté après 28 jours. Selon la littérature, les émissions de COV du bois sont dominées par les aldéhydes et les cétones [5]; par conséquent, il semble très probable que l'émission de ces composés provienne de la laine de bois. Les aldéhydes étant facilement solubles dans l'eau, ils peuvent se dissoudre après émission dans les molécules d'eau occupant les sites actifs du matériau entraînant une augmentation de la concentration initiale émissible en COV et donc une augmentation de leur émission surfacique dans le temps [14];[15].

Aucun nouveau composé n'a été détecté dans la partie ensemencée (NE_Haute_J+1 et E_Haute_J+28). On observe globalement le même comportement d'émissions de COV quand on compare l'évolution dans le temps qu'observé dans l'emplacement bas. Ceci confirme l'effet de l'humidité relative (HR) sur les émissions de COV observées.

Cependant, afin de mieux suivre la variation des émissions de COV avec l'HR, la méthodologie de prélèvement a été légèrement modifiée lors de la caractérisation des émissions de COV des deux autres parois biosourcées (mur M_défav et mur M_dégrad) (paragraphe 5.2.2.2 et 5.2.2.3).

Tableau 15 : Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) en COV de la paroi biosourcée dans des conditions hygrothermiques « normales » (mur M_norm). Source : IMT Nord-Europe

	Mur M_norm			
	NE- Haute - J+1	NE - Basse - J+1	NE - Basse - J+28	E - Haute - J+28
Ethylene glycol	2.8	3.1	<LOD	1.8
Propylene glycol	54.6	47.4	Non-quantifiable	27.7
Furfural	5.2	6.3	9.8	6.2
Formaldehyde	1.8	9.0	3.6	9.6
Acetaldehyde	46.4	7.2	3.3	3.0
Propanone	122.5	16.3	9.9	4.8
Methyl Vinyl Ketone	11.9	3.0	4.8	4.5
Methyl Ethyl Ketone	5.4	2.5	2.8	2.7
Hexanal	2.3	4.4	5.5	3.5
1-Butanol + Benzene	7.7	1.3	2.2	0.7
2-Butoxy ethanol	0.8	0.7	0.6	1.0
Octanoic + Benzoic Acids	1.0	1.1	0.5	0.7
Methylglyoxal	0.7	1.1	1.0	1.3

5.2.2.2. Évolution des émissions du mur biosourcé dans des conditions dégradées

Méthodologie d'évaluation des taux émissions

Comme décrit dans le paragraphe 5.2.2.1, deux FLECs ont été installées dans ce mur également : une sur une partie haute non-ensemencée et une autre sur la partie basse ensemencée. Par contre, cette fois, les FLECs ont été mises en place une fois l'ensemencement fait pour éviter d'enlever et de remettre en régime les FLECs. Ensuite, des prélèvements ont été réalisés après la mise en place des FLECs sur la paroi, temps qui est considéré comme T0. Les prélèvements ont été faits avec des temporalités différentes de celles décrites dans le paragraphe 5.2.2.1 afin de mieux suivre l'évolution des émissions sur les différentes parties du mur en fonction du temps. Ainsi à T0+8 jours, T0+12 jours, T0+15 jours, T0+22jours et T0+28 jours des prélèvements ont été faits sur la partie non-ensemencée (« NE ») et sur la partie du mur ensemencée (« E »).

Résultats

Les figures 9 et 10 présentent les évolutions temporelles des émissions des principaux COV mesurés respectivement sur la partie non-ensemencée et sur la partie ensemencée du mur dégradé (Mur M_dégrad).

On constate que les espèces émises sur la partie « ensemencée » et sur la partie « non-ensemencée » du mur sont globalement les mêmes. Cependant les taux d'émissions mesurées sont différents pour ces deux parties même si les ordres de grandeur sont identiques et que le classement des espèces majoritaires est voisin. Ainsi, les espèces majoritaires sont le propylène glycol, la propanone et le furfural. On constate une diminution des taux d'émissions dans le temps, entre T0+8 jours et T0+28 jours. Ce même comportement est observé pour une large majorité d'espèces à l'exception de l'acide acétique et de l'alpha-pinène. Pour ces deux espèces les taux d'émissions augmentent régulièrement au cours du temps, en particulier pour l'acide acétique et dans une moindre mesure pour l'alpha-pinène.

La diminution des taux d'émissions observée pour la majorité des espèces peut être interprétée comme une mise en régime de l'émission au regard de conditions hygrothermiques imposées aux deux extrémités du mur. Cette mise en régime peut conduire à un relatif épuisement des COV présents initialement dans la masse du matériau. A l'opposé, l'augmentation des émissions observée pour 2 COV pourrait être expliquée i) par le fait que ce mur présente l'apparition d'un développement fongique et que ces COV sont identifiés dans certaines publications [16]-[17] comme COV associés au développement de μ -organismes - ces espèces pourraient être considérées comme des COV microbiens - mais aussi ii) par le fait de la dissociation

des groupes acétyle de l'hémicellulose de la laine de bois lors d'une exposition à l'humidité et donc de l'augmentation du taux d'émissions avec le temps [6].

5.2.2.3. Comparaisons des émissions des parois défavorable et dégradée

Méthodologie d'évaluation des taux émissions

La même méthodologie que pour le mur M_dég avec un suivi temporel des émissions de COV (à T0+7 jours, T0+14 jours, T0+21 jours et T0+28 jours) a été utilisée pour caractériser les émissions de COV du mur soumis à des conditions hygrothermiques défavorables (mur M_défav). Cependant, puisque les profils d'émissions temporelle de COV obtenus pour le mur M_défav étaient similaires à ceux obtenus pour le mur M_dégrad, seuls les résultats obtenus à T0+7 jours et T0+28 jours seront présentés pour le mur M_defav dans la partie qui suit pour éviter la répétition.

Résultats

Le tableau 16 rassemble l'ensemble des COV dont les émissions ont été quantifiées comme supérieures à $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène d'une des deux parois soumises à des conditions hygrothermiques différentes (mur M_défav et mur M_dégrad). On constate que les mêmes composés sont émis par les deux parois. Pour le mur défavorable, comme pour le mur dégradé, l'émission de l'acide acétique a augmenté après 28 jours. Cependant, le taux d'émissions de l'alpha-pinène de la paroi M_défav a été faible et stable. Ceci peut s'expliquer par l'absence de développement microbien dans cette paroi contrairement à ce qui a été observé pour la paroi sous conditions dégradées. L'augmentation du taux d'émissions de l'acide acétique pour les deux parois semble donc dû à l'effet de l'humidité sur le clivage de l'hémicellulose de la laine de bois, comme mentionné précédemment. Ici, comme pour la paroi sous conditions dégradées, le taux d'émissions de quasiment tous les autres composés majoritaires ($> 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) a diminué après 28 jours d'exposition. De plus, contrairement à ce qui a été observé pour le mur M_norm, les taux d'émissions de furfural, d'hexanal, de méthyl vinyl cétone et de méthyl éthyl cétone ont diminué avec le temps pour les murs M_défav et M_dégrad. Cela peut s'expliquer par les niveaux d'humidité plus élevés qui induisent des départs plus rapides de ces composés de la source d'émissions.

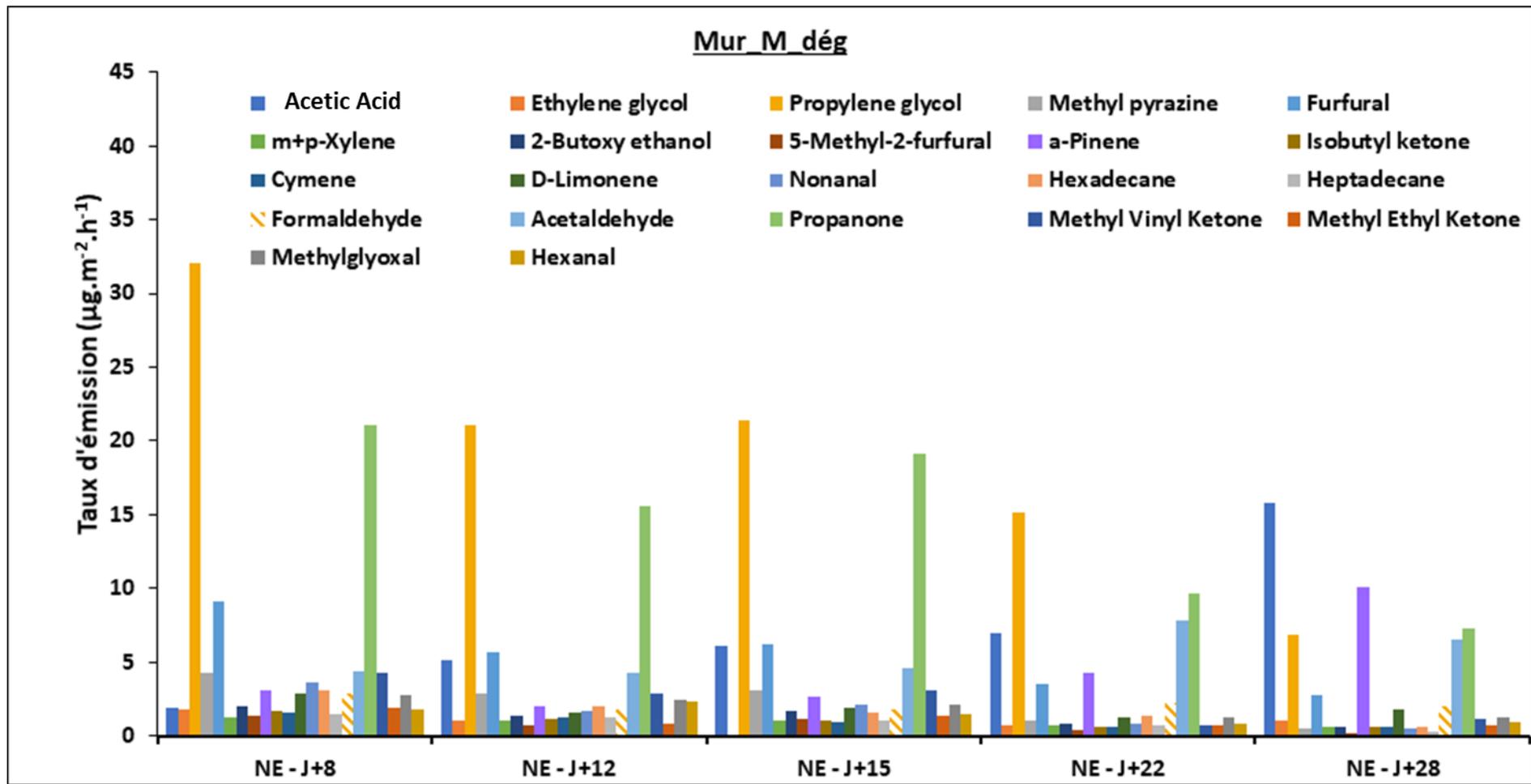


Figure 9: Émissions temporelles des COV majoritaires émis par la partie non-ensemencée (NE) de la paroi mise en conditions hygrothermiques dégradées (Mur_M_dégrad). Source : IMT Nord-Europe

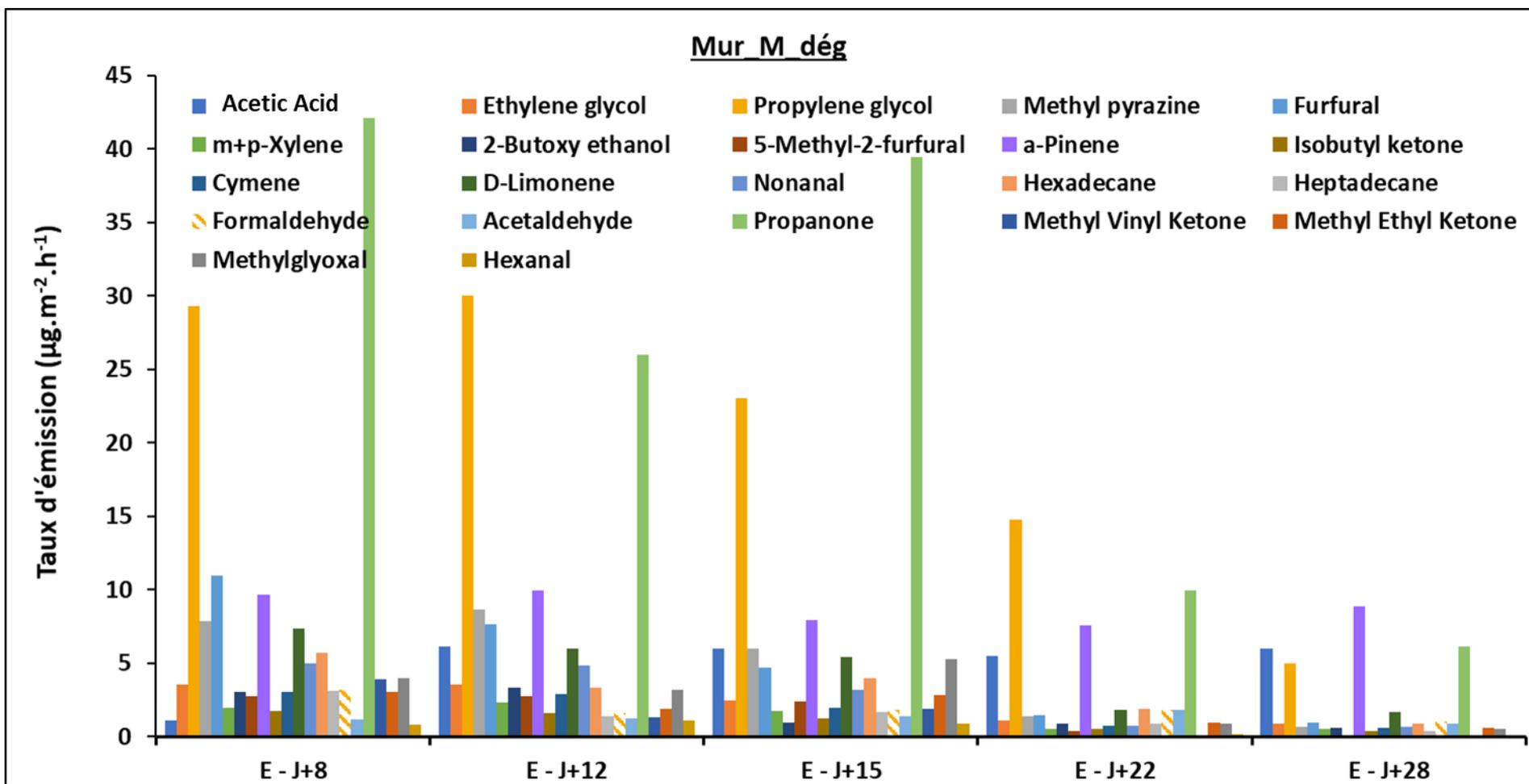


Figure 10: Émissions temporelles des COV majoritaires émis par la partie ensemencée (E) de la paroi mise en conditions hygrothermiques dégradées (Mur_M_dégrad). Source : IMT Nord-Europe

Tableau 16: Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) en COV des 2 murs biosourcés dans des conditions hygrothermiques différentes. Source : IMT Nord-Europe

	Mur M_défav				Mur M_dégrad			
	NE - J+7	NE - J+28	E - J+7	E - J+28	NE - J+8	NE - J+28	E - J+8	E - J+28
Acetic acid	1.4	1.8	2.0	4.3	2.0	15.8	1.1	6.0
Ethylene glycol	4.3	5.6	4.3	3.8	1.8	1.1	3.5	0.9
Propylene glycol	25.2	24.8	13.8	8.4	32.1	6.8	29.3	5.0
Methyl pyrazine	1.6	1.4	0.9	0.8	4.3	0.5	7.9	0.7
Furfural	17.2	10.7	10.7	6.2	9.2	2.8	11.0	0.9
Isobutyl Ketone	3.2	3.7	0.6	0.8	1.7	0.6	1.7	0.3
Nonanal	4.1	3.0	3.1	2.4	3.6	0.5	5.0	0.6
Hexadecane	0.1	0.1	0.1	0.1	3.1	0.6	5.7	0.9
Formaldehyde	9.0	2.8	6.9	2.0	2.9	2.0	3.2	1.0
Acetaldehyde	5.5	3.4	5.5	3.4	4.4	6.5	1.2	0.9
Propanone	6.7	2.2	9.4	15.1	21.1	7.3	42.1	6.1
Methyl Vinyl Ketone	11.3	6.4	7.6	4.2	4.3	1.1	3.9	0.1
Methyl Ethyl Ketone	5.7	0.1	5.7	1.7	1.9	0.7	3.0	0.6
Hexanal	3.5	1.6	2.7	1.7	1.8	0.9	0.8	0.1
1-Butanol + Benzene	1.2	1.3	0.3	0.3	0.8	1.7	0.4	0.2
m+p-Xylene	0.8	0.8	0.7	0.7	1.2	0.6	2.0	0.5
2-Butoxy ethanol	0.6	0.7	0.5	0.5	2.0	0.6	3.0	0.6
Methylglyoxal	0.8	0.6	0.5	0.3	2.7	1.2	4.0	0.5
a-Pinene	0.4	0.4	0.3	0.2	3.1	10.1	9.7	8.9
Cymene	0.4	0.5	0.4	0.2	1.6	0.7	3.0	0.6
D-Limonene	0.4	0.5	0.4	0.3	2.9	1.8	7.4	1.7

5.2.2.4. Spécificité des émissions associées à la paroi présentant des moisissures

Le développement microbien n'a été observé que sur la paroi soumise à des conditions hygrothermiques défavorables et construite avec des défauts – donc en conditions dégradées (mur M_dégrad) (cf 5.2.2.1). L'émission de composés organiques volatils microbiens (COVm) peut être l'un des marqueurs du développement des moisissures. Pour cette raison nous avons recherché parmi les COV émis par le mur M_dégrad tous les COV classés dans la littérature comme COVm [16],[17]. Certains de ces composés (comme le 1-butanol et le 2-éthyl-1-hexanol) ont été éliminés en tant que COVm car ils étaient également émis par les deux autres parois (mur M_norm et mur M_défav), où aucun développement microbien n'a été observé. Ces composés proviennent probablement d'émissions de matériaux ou d'autres sources non associées au bâti. La figure 11 montre l'émission temporelle des 10 composés uniquement émis par les partiesensemencées et nonensemencées de la paroi mise sous conditions hygrothermiques dégradées (mur M_dégrad) et qui sont potentiellement considérés comme COVm.

Cependant, comme le montre la figure 11, ces composés ont également été émis par la partie non-ensemencée (NE), où normalement aucun développement microbien n'a eu lieu. La différence d'intensité des émissions entre les deux parties peut être associée à l'inhomogénéité de la surface, comme vu précédemment. Pour cette raison, un rapport du taux d'émissions des COVm de la partieensemencée à ceux de la partie non-ensemencée a été calculé pour vérifier si les émissions de ces potentiels COVm augmentent avec le temps ou restent stables. Ces calculs sont présentés dans le tableau 17.

Comme le montre le tableau 17, le rapport des émissions de 10 composés atteint son *maximum* après 12 jours d'émissions puis diminue avec le temps. Selon la littérature, les phases de développement des moisissures (germination, développement mycélien et formation de spores) prennent environ 7 à 8 jours et l'émission de COVm continue à augmenter même après 25 jours d'incubation [16]. Ce profil temporel ne correspond pas à celui observé dans notre étude. Par conséquent, la nouvelle apparence de ces composés et leur cinétique d'émissions peuvent être liées à la forte humidité relative appliquée plutôt qu'au développement microbien, ou à un mélange des deux. Ainsi, la classification de ces 10 composés comme COVm reste incertaine et nécessite des expérimentations supplémentaires.

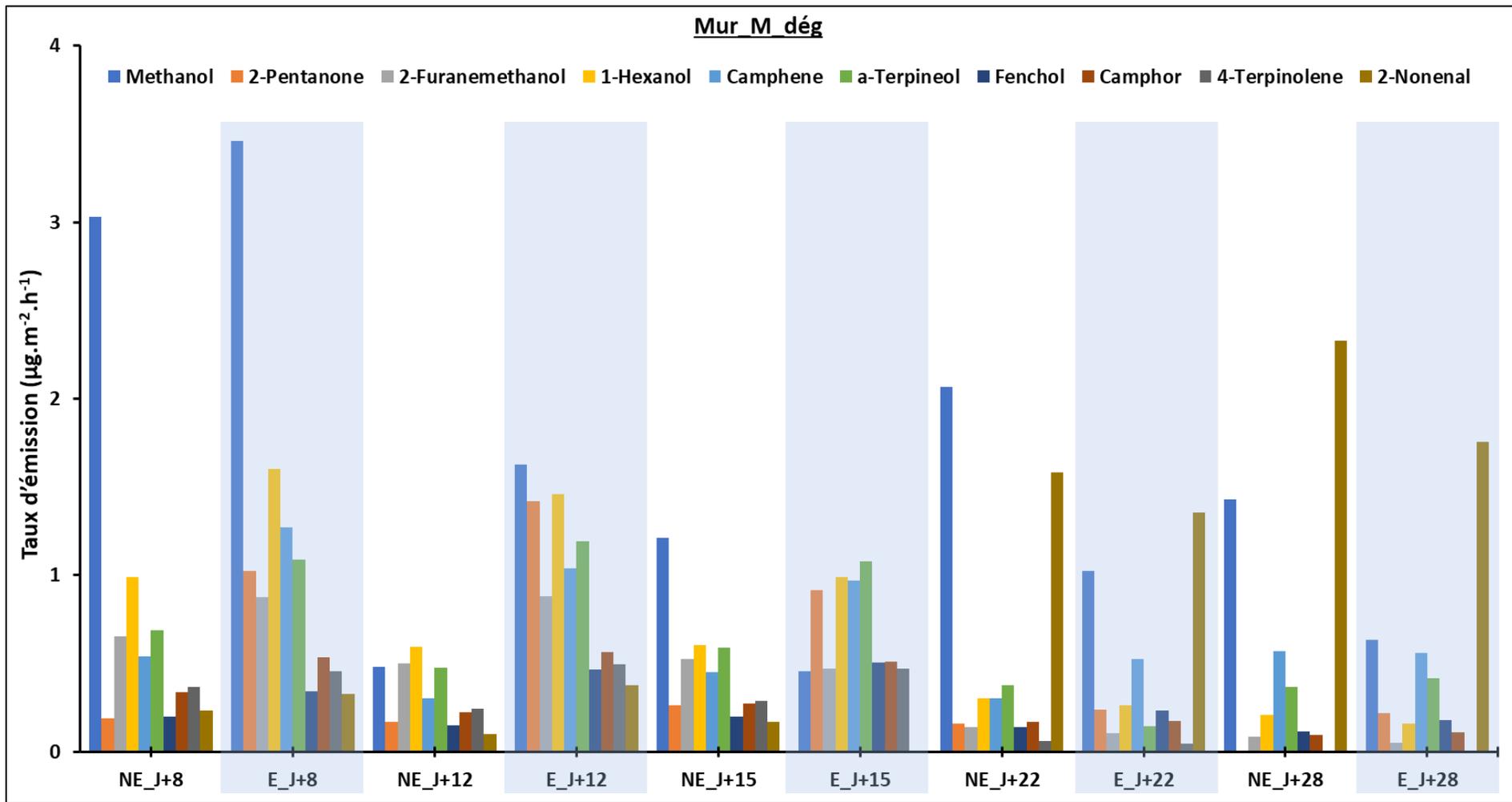


Figure 11: Émissions temporelles de COV microbiens (COVm) potentiels de la partie nonensemencée (NE) et la partie ensemencée de la paroi soumises à des conditions hygrothermiques dégradées (Mur_M_dégrad). Source : IMT Nord-Europe

Tableau 17: Résumé des rapports ($Ratio = T_E/T_{NE}$) du taux d'émissions du potentiel COV_m de la partie ensemencée (E) au taux d'émissions de la partie non-ensemencée (NE) de la paroi soumise aux conditions hygrothermiques dégradées (mur M_dégrad). Source : IMT Nord-Europe

Compound	Ratio J+8	Ratio J+12	Ratio J+15	Ratio J+22	Ratio J+28
Methanol	1	3	0	1	0
2-Pentanone	5	8	4	2	/
2-Furanemethanol	1	2	1	1	1
1-Hexanol	2	3	2	1	1
Camphene	2	3	2	2	1
a-Terpineol	2	3	2	0	1
Fenchol	2	3	3	2	2
4-Terpinolene	1	2	2	1	/
2-Nonenal	1	4	/	1	1

5.2.3. Mur biosourcé ouate de cellulose

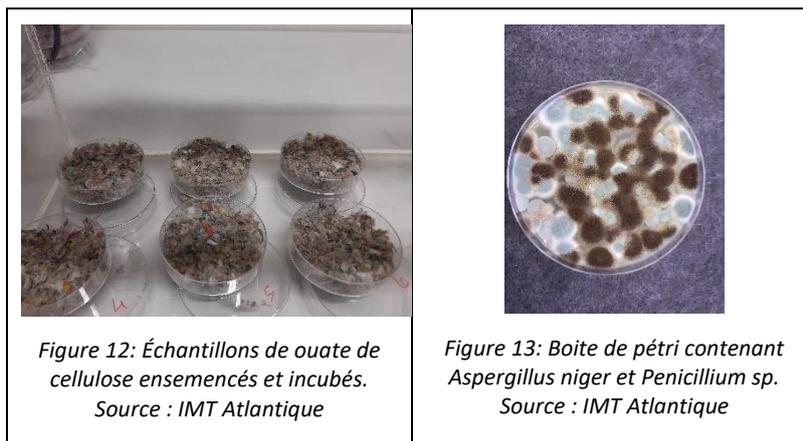
5.2.3.1. Démarche adaptée

Pour le cas des murs contenant de la ouate de cellulose du groupe scolaire, le protocole initialement prévu a dû être adapté. En effet, l'isolant dans ce cas est contenu dans des caissons préparés en usine puis mis en place dans la structure des murs. La probabilité que la ouate de cellulose soit humidifiée étant très faible, la problématique est donc bien différente du cas du mur rénové de la mairie de Moncheaux. De plus, dans les murs réalisés à façon pour le projet par une entreprise locale, un tassement a pu être observé (Annexe 3), tassement qui ne semble pas avoir lieu sur site réel car aucun pont thermique répétitif n'a pu être mis en évidence à la caméra thermique. C'est pourquoi il a été proposé une adaptation du protocole pour la partie microbiologie de la tâche 4 du projet en réalisant un pré-conditionnement d'un échantillon de ouate de cellulose à 85 % HR (22 °C) pendant 4 semaines. Puis ce dernier a été inoculé avec une suspension d'*Aspergillus niger* et de *Penicillium sp.* L'échantillon a été incubé pendant 4 semaines dans les mêmes conditions de température et d'humidité relative avant extraction des spores pour déterminer si la ouate de cellulose pouvait potentiellement supporter le développement fongique. Un témoin inoculation a été réalisé afin de déterminer la quantité de spores déposée. Les échantillons des essais auront été au préalable pesés afin de quantifier l'eau absorbée.

Concernant la partie émission de COV seuls les divers éléments constitutifs des caissons ont été analysés dans la CLIMPAQ étant donné que le positionnement d'un caisson en cellule climatique n'était plus opportun.

5.2.3.2. Caractérisation du développement de micro-organismes dans les différentes parois

Les échantillons de ouate de cellulose ont été inoculés avec $7,34 \cdot 10^5 \pm 2,22 \cdot 10^4$ spores/g matériau. La figure 12 représente les 6 échantillons inoculés dans la chambre d'incubation à 22 ± 2 °C et 90 ± 5 % d'humidité relative. Après 4 semaines d'incubation, les échantillons ont été placés dans 20 mL de solution d'extraction et placés sur une table d'agitation pendant 2h. La concentration en spore a été déterminée par la méthode de Unités Formants colonies (UFC). La quantité résiduelle sur la ouate de cellulose après 4 semaines a été de $8,27 \cdot 10^2 \pm 4,05 \cdot 10^2$ spores/g de matériau. Il apparaît que la ouate de cellulose présente un effet antifongique marqué (diminution de 3 log de la viabilité fongique). Les résultats concernant la sensibilité des 2 genres fongiques utilisés lors de l'inoculation ne montre pas de différence notable (figure 13).



5.2.4. Comparaison des émissions de COV des trois parois avec les émissions des matériaux seuls

Une comparaison des émissions de COV des 3 parois soumises à différentes conditions hygrothermiques avec les émissions des matériaux individuels constituant la paroi biosourcée à Moncheaux a eu lieu. La figure 14 rassemble les composés majoritaires ($> 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) émis par chaque matériau constituant la paroi ainsi que les composés majoritaires émis par les 3 parois mises sous conditions hygrothermiques différentes (murs M_norm, M_défav et M_dégrad).

Comme le montre la figure 14, le formaldéhyde, le furfural, l'acétaldéhyde et la propanone ont été détectés en commun. Cependant, l'acide acétique n'a été émis que par la paroi soumise à des conditions hygrothermiques dégradées (mur M_dég) mettant en évidence à nouveau l'effet de l'humidité sur le clivage de l'hémicellulose présente dans la laine de bois en acide acétique [6]. L'émission des autres composés (méthylglyoxal, acide benzoïque, acide borinique et a-irone) par les matériaux individuels n'a pas été retrouvée dans l'émission des 3 parois. Ceci peut s'expliquer par le fait que les COV émis par la laine de bois encastré dans le mur, doivent diffuser à travers toutes les autres structures murales existantes (pare-vapeur et placoplâtre), où ils peuvent être adsorbés, avant d'arriver à la surface où la FLEC est installée. De plus, les émissions de COV par les parois sont captées en surface après diffusion dans une seule direction, horizontale, de la surface du matériau vers la FLEC, tandis que l'exposition des matériaux individuels en chambre d'essai prend en compte les émissions dans toutes les directions.

En revanche, l'émission de propylène glycol par les trois parois et non par les matériaux individuels peut s'expliquer par le fait que ce composé provient potentiellement d'une source annexe non associée au bâti biosourcé ou d'une contamination liée à des activités diverses qui peuvent avoir eu lieu dans la pièce considérée.

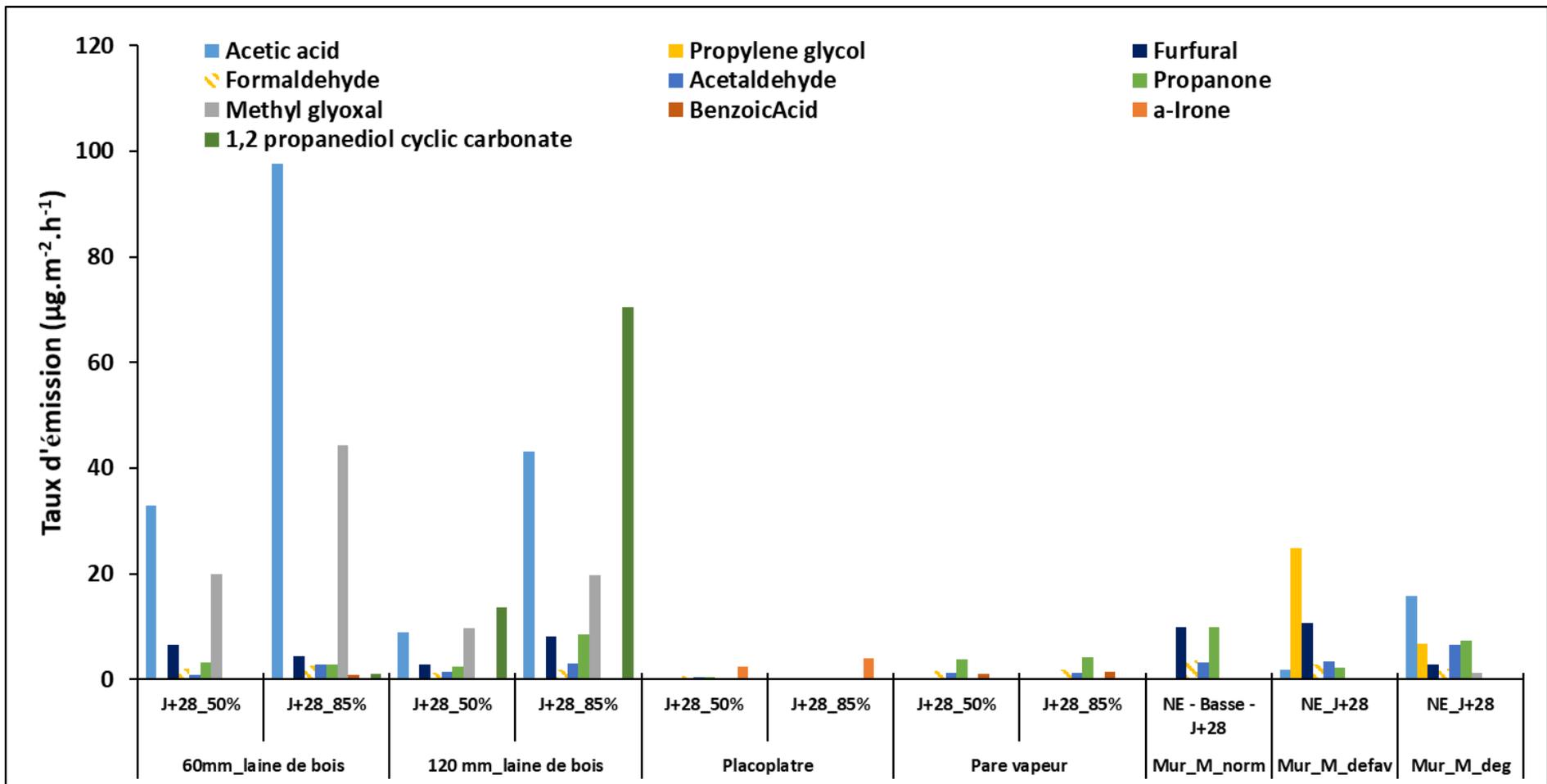


Figure 14: Comparaison des émissions de COV des matériaux individuels constituant les murs biosourcés à Moncheaux aux émissions des trois parois soumises aux différentes conditions hygrothermiques. Source : IMT Nord-Europe

5.2.5. Comparaison avec les émissions sur site

Une comparaison des émissions de COV de la paroi soumise aux conditions hygrothermiques normales (mur M_norm) aux émissions hivernales et estivales des 3 murs biosourcés (paragraphe 6) sur site à Moncheaux a eu lieu. La figure 15 et la figure 16 rassemblent, respectivement, 6 composés majoritaires ($> 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) émis par la paroi M_norm avant ensemencement et 8 composés majoritaires ($> 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) émis par les 3 murs biosourcés en période estivale et hivernale.

Comme le montrent les figures, tous les 6 composés majoritaires émis par la paroi, à l'exception de l'éthylène glycol, ont été détectés en commun entre les émissions du mur M_norm et les émissions estivales des 3 murs, en particulier le mur orienté Sud-Est (SE). En hiver, seule l'émission du formaldéhyde des 3 murs était détectée en commun avec une intensité non négligeable. Cela peut être expliqué par le fait qu'en été la température dans la salle de mariage à Moncheaux était plus élevée (29 °C) qu'en hiver (21 °C) et, par conséquent, les émissions de COV en période estivale sont plus élevées.

La majorité des 8 COV majoritaires émis sur site ont été détectés également dans les émissions de la paroi, même si les taux d'émissions restent variables. Les taux d'émissions de COV sur site sont en général plus faibles comparés aux émissions de la paroi. Cela peut être associé à i) l'âge du bâtiment ; en effet, un vieillissement naturel des matériaux peut entraîner une diminution des taux d'émissions par épuisement et ii) l'humidité relative plus élevée au niveau de la paroi (70 %) par rapport aux niveaux sur site (40 %) qui peut également induire des émissions de COV plus élevées.

Dans le cas où les émissions sur site sont plus importantes, comme pour le formaldéhyde et les acides, une source associée à la mise en œuvre des matériaux peut être évoquée, ainsi que potentiellement des phénomènes de contamination liés à des activités diverses (nettoyage intensif du sol en été) qui peuvent avoir eu lieu dans la pièce considérée.

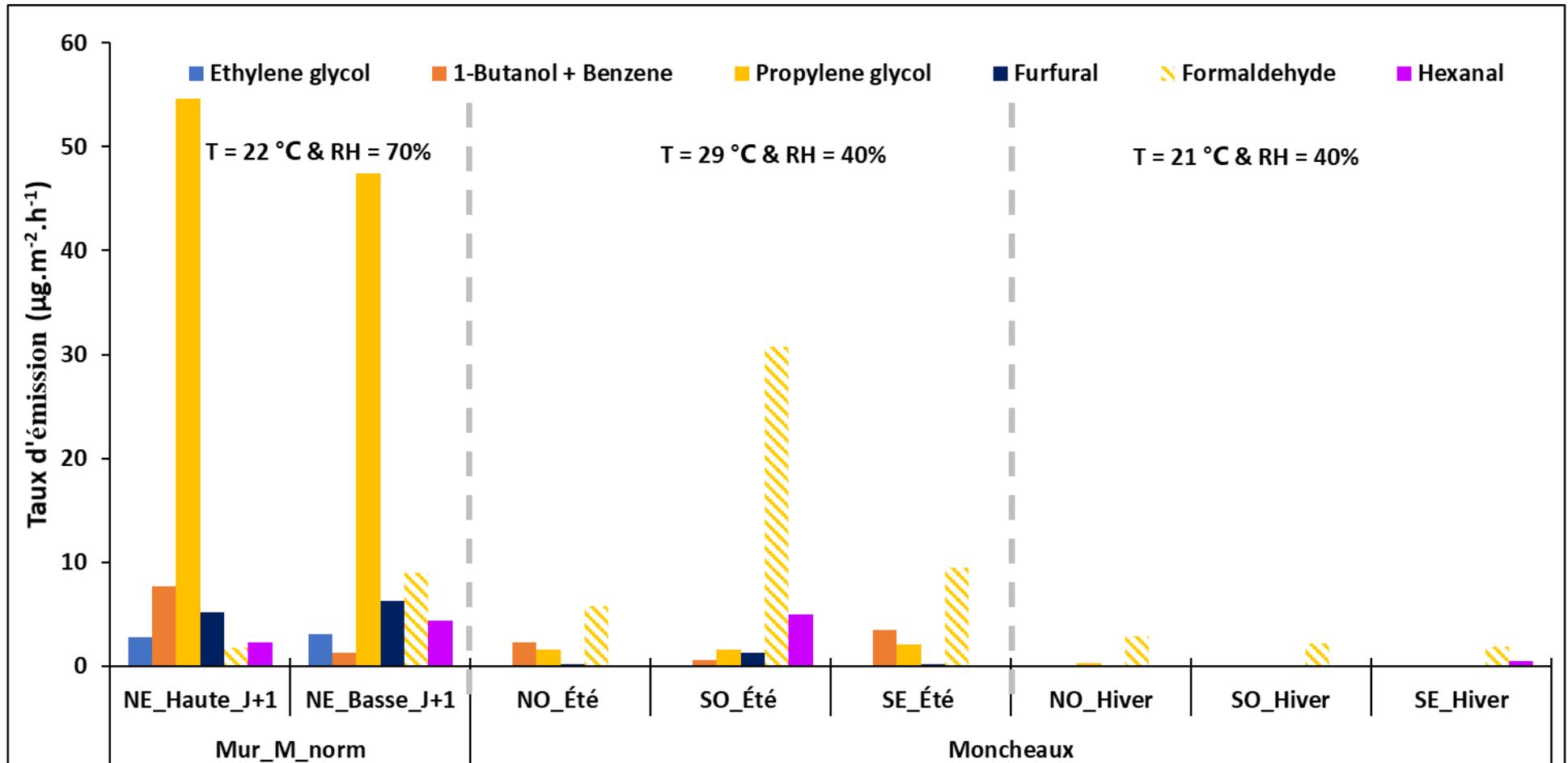


Figure 15: Comparaison des émissions de COV majoritaires émis par la paroi soumise aux conditions hygrothermiques normale (Mur_M_norm) aux émissions de COV par les 3 murs biosourcés dans la salle de mariage de la mairie de Moncheaux en période estivale et hivernale. Source : IMT Nord-Europe

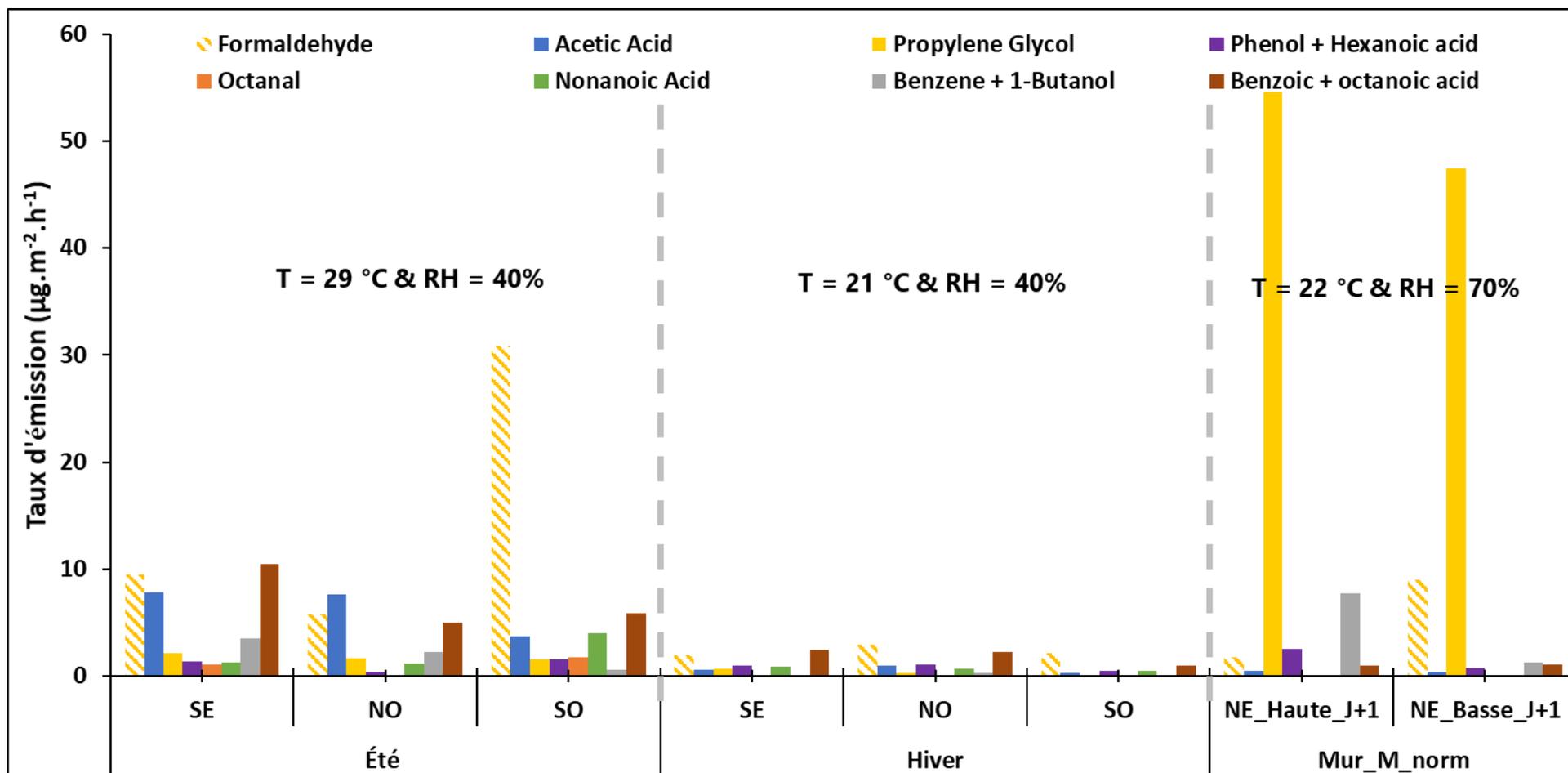


Figure 16: Comparaison des émissions de COV majoritaires émis par les 3 murs biosourcés de la salle de mariage de la mairie de Moncheaux en été et en hiver aux émissions de la paroi soumise aux conditions hygrothermiques normale (Mur_M_norm). . Source : IMT Nord-Europe

6. Emissions sur sites réels et pollution de l'air intérieur en fonction des conditions hygrothermiques

6.1. Bâtiment 1 – bâtiment ancien rénové – la mairie de Moncheaux

6.1.1. Synthèse du diagnostic bâtiment du site n°1

Le diagnostic QAI/ventilation n'a pas révélé de source de pollution extérieure déterminante et peu de sources de polluants intérieurs. Néanmoins, il convient d'apporter une attention particulière aux produits d'entretien réellement utilisés (enlever les produits non utiles et limiter au *maximum* les mélanges), et un point d'attention est donné sur la présence de panneaux OSB à nu dans la circulation datant de fin 2013. La CTA en revanche ne fonctionnait pas de manière optimale lors de l'été 2019, mais elle fonctionnait lors des tests de l'hiver 2020. Il semble en revanche que le débit de consigne soit largement inférieur au débit réglementaire à atteindre lors des cérémonies et lors des conseils municipaux. Ce point a été signalé à la mairie.

Le diagnostic détaillé est repris en [Annexe 1](#).

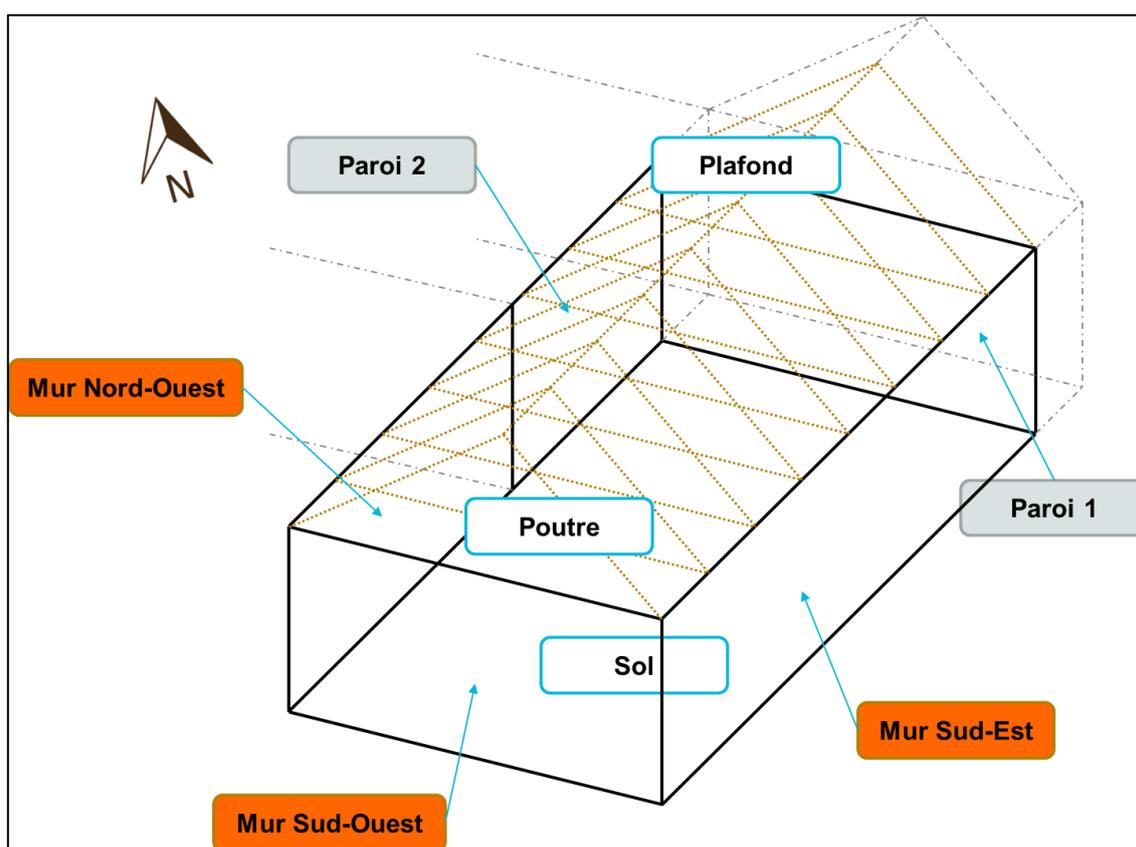


Figure 17: Présentation schématique de la salle des mariages de la mairie de Moncheaux et repérage des différentes surfaces dont les émissions sont mesurées. Source: IMT Nord-Europe

6.1.2. Mesures en surfaces du site n°1

6.1.2.1. Mur biosourcé: évolution hygrothermique annuelle et évolution des émissions sur 24h

Les capteurs mis en place dans la paroi permettent de suivre la température et l'humidité relative en fonction du temps, sur une année complète en continu. Les capteurs sont des thermo-hygromètres de la marque Vaisala, de type HMP 60, leur positionnement dans la paroi est le suivant :

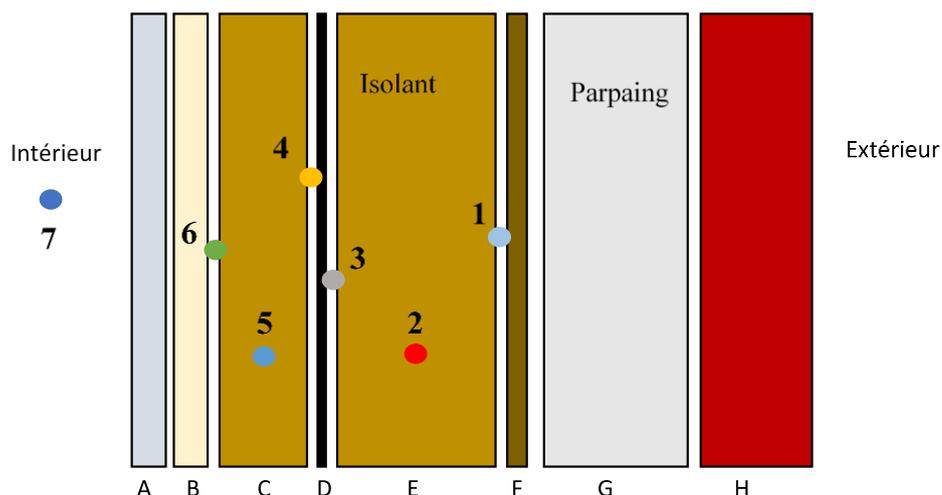


Figure 18: positionnement des thermo-hygromètres au sein de la paroi. Source : Université d'Artois

Les HMP 60 permettent la mesure des températures T ($^{\circ}\text{C}$) et humidités relatives HR (%) toutes les 10 minutes, ils sont placés :

- Dans le volume intérieur du bâtiment (7)
- A l'interface plaque de plâtre/laine de bois (6)
- A mi-épaisseur des isolants laine de bois (60 mm et 120 mm) (5 et 2)
- De part et d'autre de la membrane d'étanchéité à l'air ou pare-vapeur (3 et 4)
- Dans la lame d'air à l'interface isolant/parpaing (1)
- Un capteur a été placé à l'extérieur à partir de novembre 2019, mais n'a fonctionné qu'en intermittence

L'humidité spécifique HS (kg eau/kg air sec) a été calculée à partir des mesures de température et d'humidité relative, en supposant la pression égale à 101325 Pa.

Les courbes présentées ci-après montrent les évolutions des humidités relatives, des températures et des humidités spécifiques sur 24H, en été le 09/07/2019 et en hiver le 30/01/2020. Ces deux dates coïncident avec les campagnes de mesures réalisées *in situ*.

En été, les faibles écarts de températures entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment font que les valeurs d'humidité relative se regroupent dans un faisceau de courbes assez resserré. Les principales valeurs sont comprises entre 40 % et 50 % (aucun risque de condensation), le capteur positionné entre l'isolant et le mur extérieur est plus influencé par les variations de températures extérieures, ce qui influence la valeur d'humidité relative à cet endroit. Pour s'affranchir de cette influence de la température, il faut étudier les valeurs de l'humidité spécifique HS (kg eau /kg air sec). On se rend compte que le faisceau de courbes est très resserré, entre 0.0085 kg eau /kg air sec et 0.0095 kg eau /kg air sec.

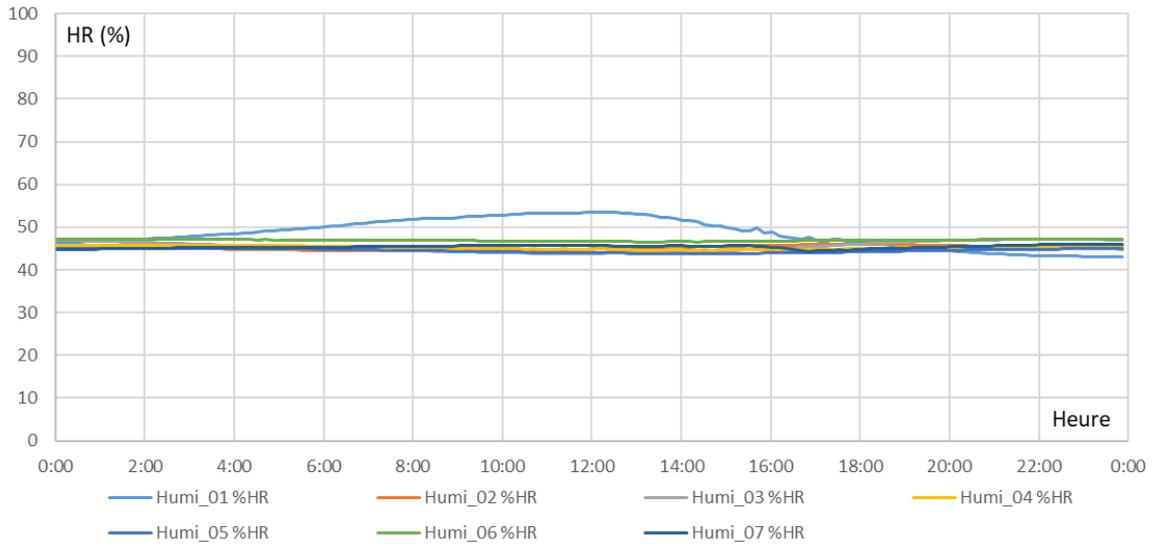


Figure 19: Evolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi le 09/07/2019. Source : Université d'Artois

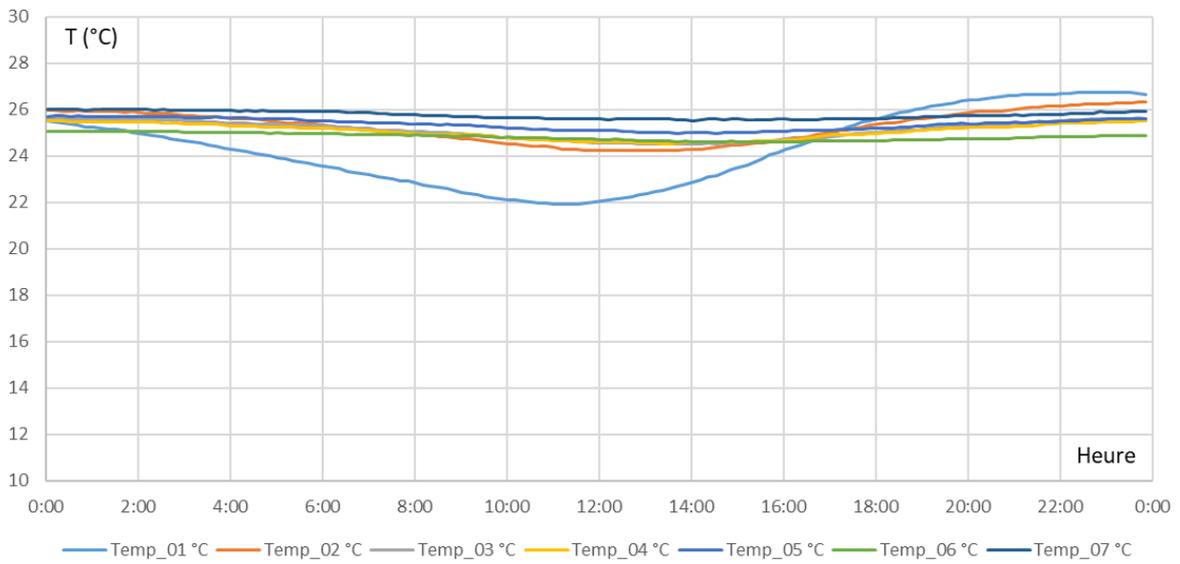


Figure 20: Evolution de la température T(°C) dans l'épaisseur de la paroi le 09/07/2019. Source : Université d'Artois

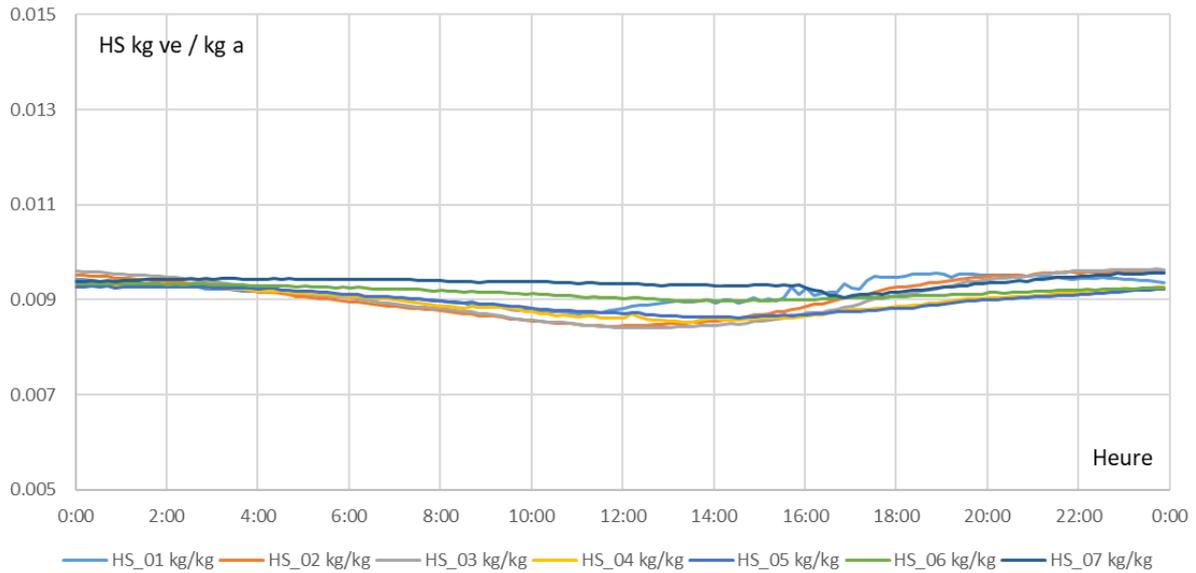


Figure 21: Evolution de l'humidité spécifique HS (kg d'eau / kg air sec) dans l'épaisseur de la paroi le 09/07/2019. Source : Université d'Artois

En hiver, les écarts de températures entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment sont plus importants, environ 10 °C au sein de la paroi. Les valeurs d'humidités relatives sont influencées et varient entre HR=40 % et HR=80 % environ. La saturation n'est pas atteinte, il n'y a pas de risque de condensation (HR = 100 %) au sein de la paroi. Dans l'air extérieur par contre, on s'approche de la saturation (températures plus faibles). Concernant l'humidité spécifique, les valeurs sont faibles et varient entre 0.0055 kg eau /kg air sec et 0.006 kg eau /kg air sec, ce qui est plus faible qu'en été, et semble peu influencée par les variations extérieures entre 0.0045 kg eau /kg air sec et 0.008 kg eau /kg air sec.

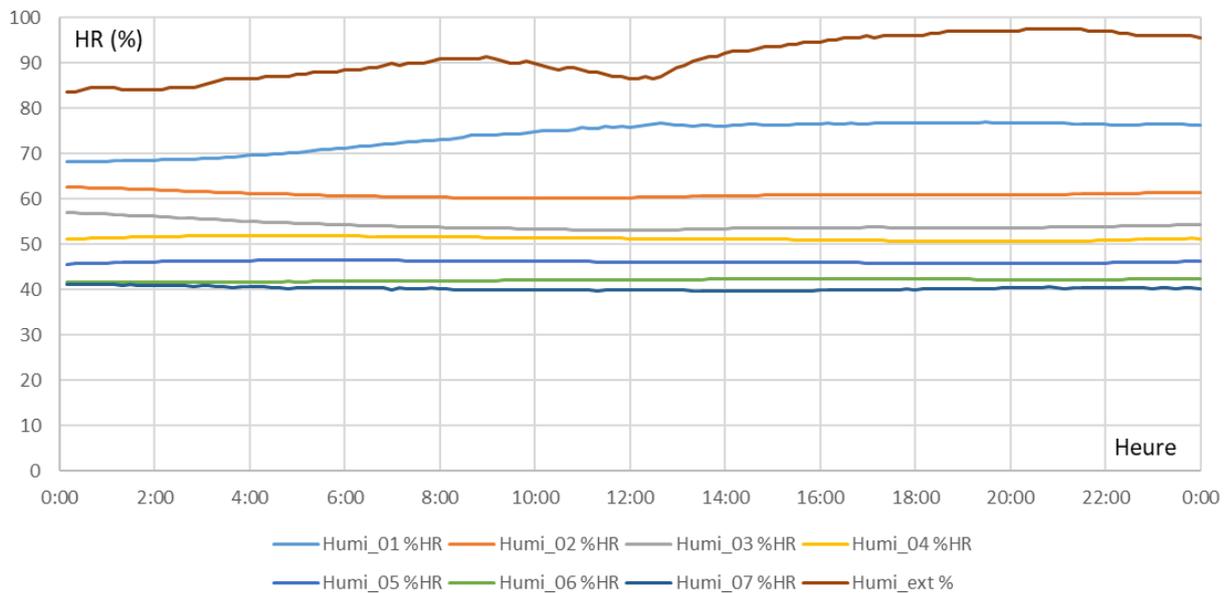


Figure 22: Évolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi le 30/01/2020. Source : Université d'Artois

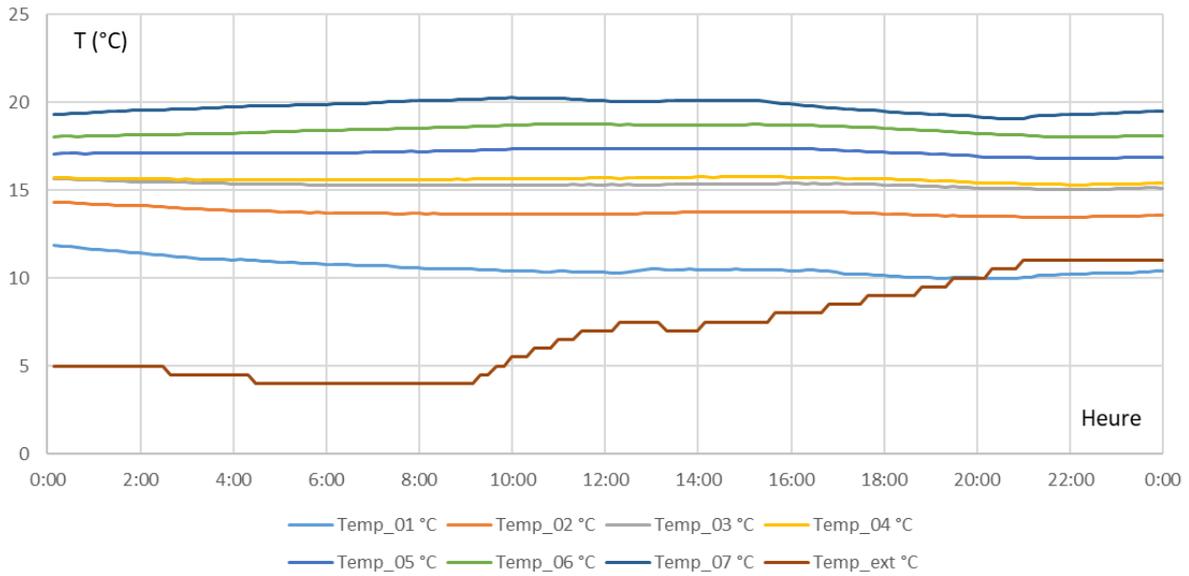


Figure 23: Évolution de la température T (°C) dans l'épaisseur de la paroi le 30/01/2020. Source : Université d'Artois

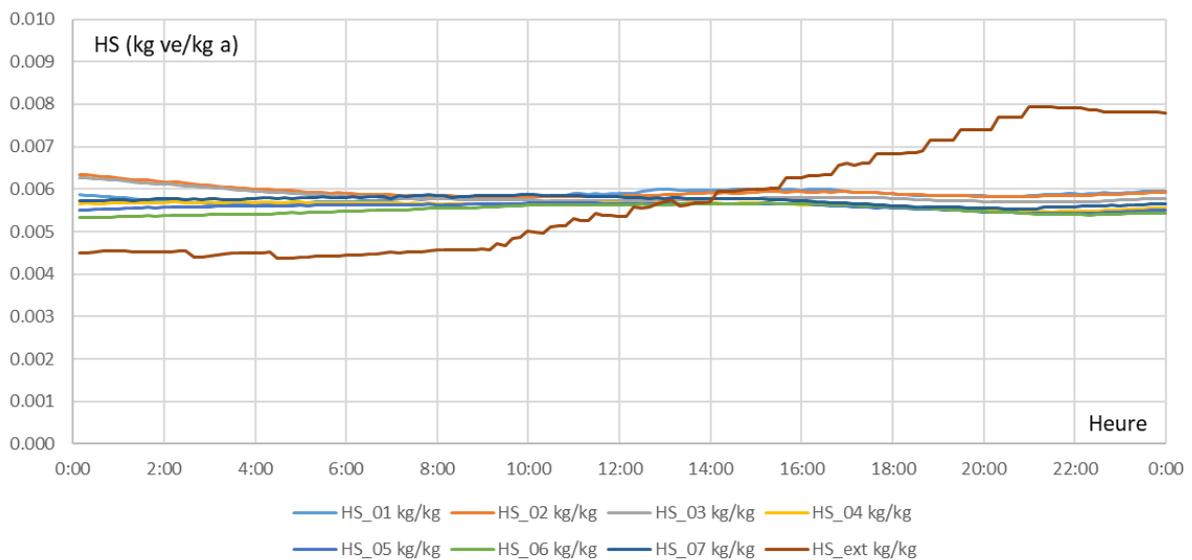


Figure 24: Évolution de l'humidité spécifique HS (kg vapeur d'eau / kg air) dans l'épaisseur de la paroi le 30/01/2020. Source : Université d'Artois

Les figures suivantes montrent les évolutions de températures, d'humidité relative et d'humidité spécifique sur une année complète, du 14/06/2019 au 08/06/2020. Les évolutions de température au sein de la paroi sur une année montrent bien l'influence de la régulation de chauffage sur la période allant de mi-septembre à fin mars. Le gradient de température dans la paroi peut monter jusque 15 °C. En dehors de cette période de régulation, demi-saison et été, la paroi est directement influencée par la température extérieure, les écarts de température à un instant t dans la paroi sont très réduits.

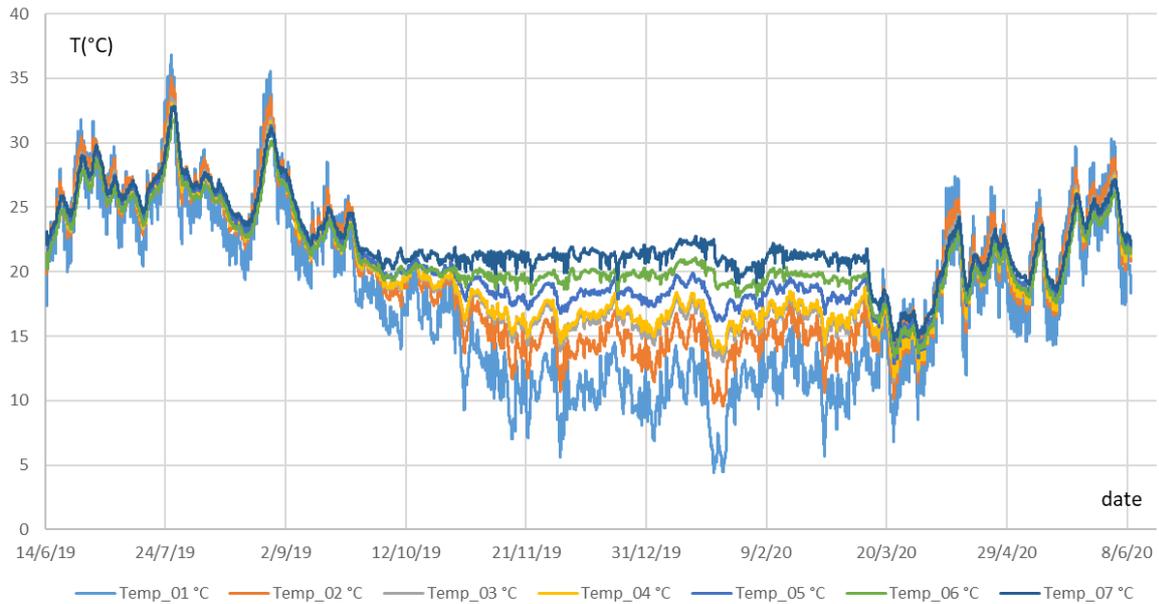


Figure 25: Évolution de la température T (°C) dans l'épaisseur de la paroi du 14/06/2019 au 08/06/2020. Source : Université d'Artois

Les évolutions d'humidité relative au sein de la paroi sur une année montrent qu'il n'y a pas de risque de condensation ($HR < 90\%$), quel que soit l'endroit où on se place dans la paroi. Les humidités relatives se situent entre 40 % et 60 % en été et en demi-saison. Pendant la période de chauffage, l'humidité relative se situe, pour la majorité des points de mesure, entre 30 % et 70 %. Seul le capteur placé à l'interface isolant/paroi porteuse enregistre des valeurs comprises entre 70 % et 90 % d'humidité relative.

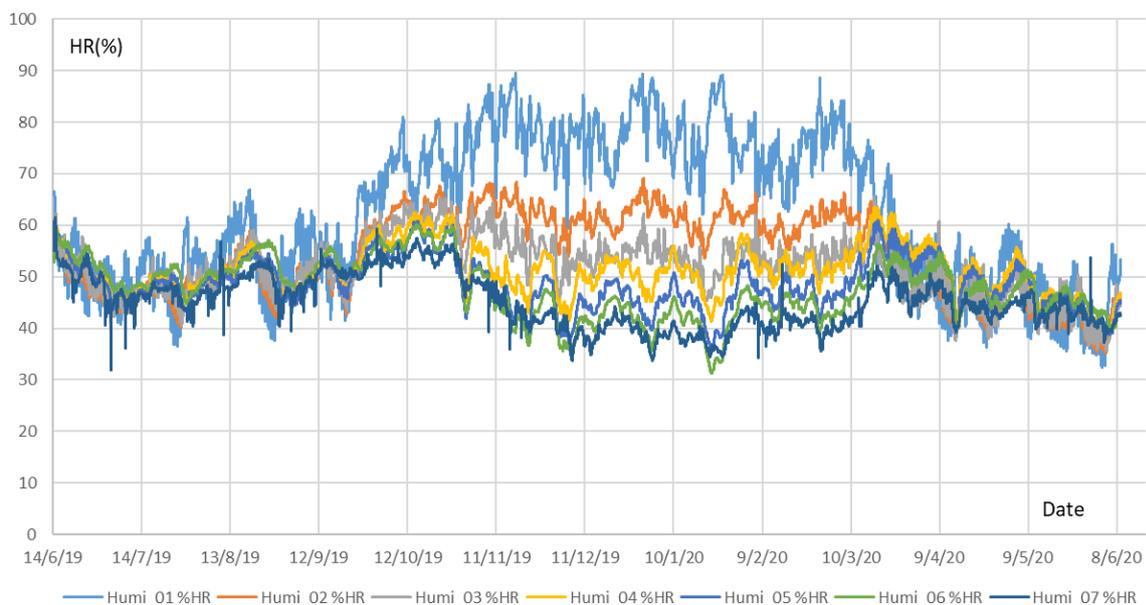


Figure 26: Évolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi du 14/06/2019 au 08/06/2020. Source : Université d'Artois

Les calculs de valeurs d'humidité spécifique HS montrent une forte variabilité au cours de l'année en fonction des saisons, on observe un rapport de 4 entre les valeurs les plus élevées et les plus faibles. Les *maxima* sont observés en été, jusque 0.016 kg eau /kg air sec, les *minimi* en hiver, environ 0.004 kg eau /kg air sec. La moyenne hivernale est d'environ 0.006 kg eau /kg air sec, ce qui est relativement faible et explique qu'il n'y a pas de risque de condensation pendant cette période.

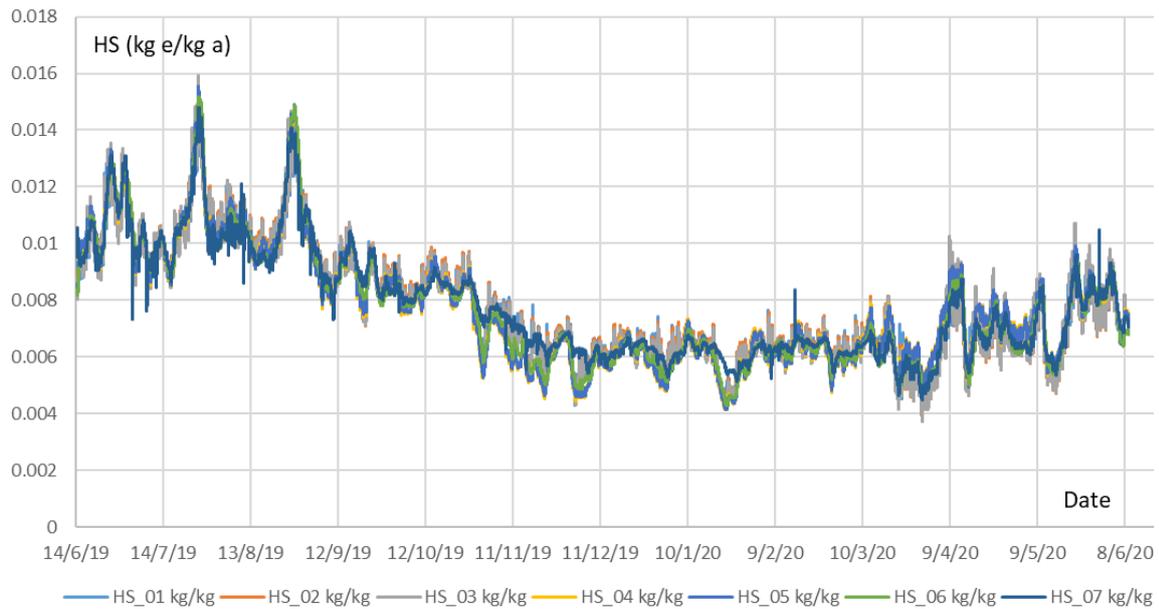


Figure 27: Évolution de l'humidité spécifique HS (kg vapeur d'eau / kg air) dans l'épaisseur de la paroi du 14/06/2019 au 08/06/2020. Source : Université d'Artois

6.1.2.2. Évolution des émissions de différents murs biosourcés

Deux campagnes de mesures ont donc été conduites pour évaluer les émissions des différentes surfaces du bâti et l'ensemble des résultats pour les COV présentant au moins une valeur de taux d'émissions supérieure à $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène sont rassemblés dans le tableau 18 du paragraphe 6.1.2.3. La méthodologie déployée est présentée en [Annexe 5](#) et les résultats plus détaillés en [Annexe 6](#).

Variabilité spatiale des émissions d'un mur intégrant un isolant biosourcé

Les émissions estivales de COV ont été mesurées sur le mur orienté Sud-Est (SE) à deux hauteurs (0,5 et 1,5 m) pour évaluer la variabilité des émissions de COV à deux endroits différents. La figure 28 montre que les variations des taux d'émissions mesurées des 5 composés majoritaires (formaldéhyde, propylène glycol, 1-butanol, acides benzoïque et octanoïque et phtalate), en plus du COVT, sont inférieurs à 30 %. Cependant, pour d'autres composés comme l'acide acétique et l'acide nonanoïque, la différence est plus importante (jusqu'à 90 %) et cette différence devient d'autant plus drastique lorsque les taux d'émissions sont faibles (c'est-à-dire $< 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène). Ces résultats soulignent que la non-homogénéité de la surface doit être prise en compte idéalement lors de la caractérisation des émissions de COV et sinon, *a minima*, lors de l'interprétation des résultats.

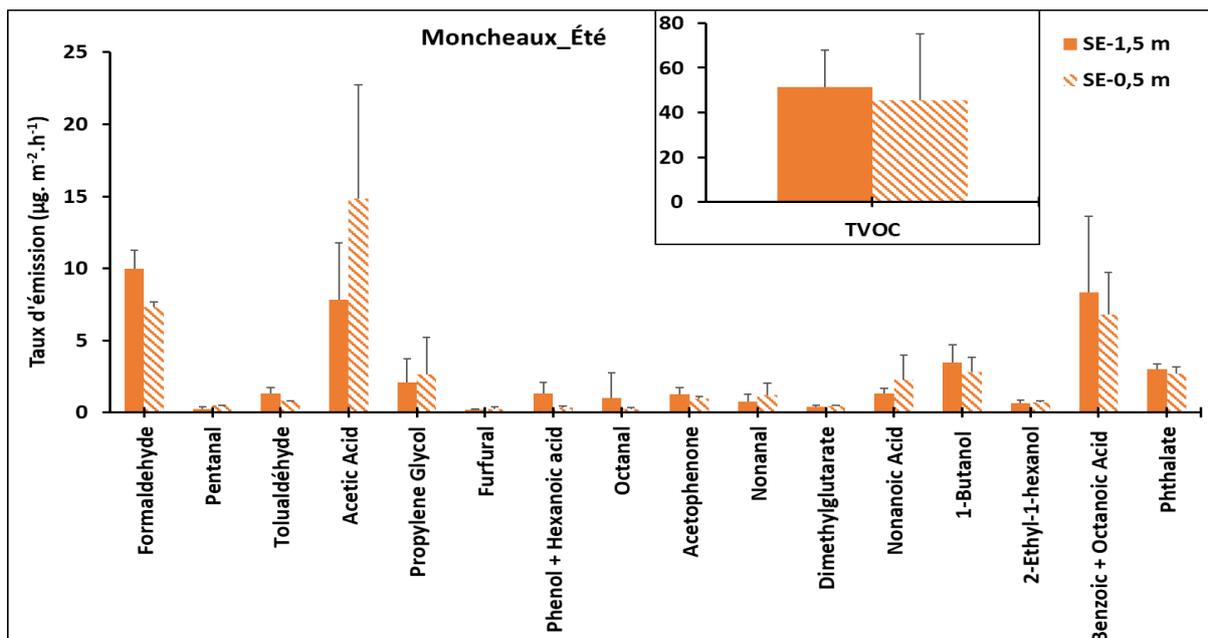


Figure 28: La variation spatiale des émissions de COV du mur orienté sud-est en été à Moncheaux. Source : IMT Nord-Europe

Résultats des émissions sur les différents murs intégrant des éléments biosourcés au cours des deux saisons explorées

La figure 29 présente les taux d'émissions des trois parois intégrant l'isolant biosourcé. Il est possible de constater d'une part que les COV identifiés majoritairement lors de deux campagnes estivale et hivernale sont de même nature et d'autre part que les taux d'émissions sont sensiblement plus importants en été qu'en hiver. Cette évolution saisonnière des taux d'émissions est en accord avec les conditions hygrothermiques mesurées au niveau de la paroi instrumentée (Sud-Est). En effet, lors de la période de mesure des différentes surfaces qui s'étend du 12 au 16 juillet 2019, la température intérieure du mur Sud-Est varie entre 25 et 27 °C et l'humidité entre 45 % et 47 % alors qu'en hiver pendant la période du 28 janvier au 1^{er} février 2020, la température varie entre 19 et 21 °C et l'humidité entre 37 et 44 %. Ainsi l'évolution significative de la température de l'ordre de 5 °C entre hiver et été peut expliquer l'amplification du phénomène de désorption des COV de la surface des matériaux conduisant à une augmentation des taux d'émissions [18]–[20].

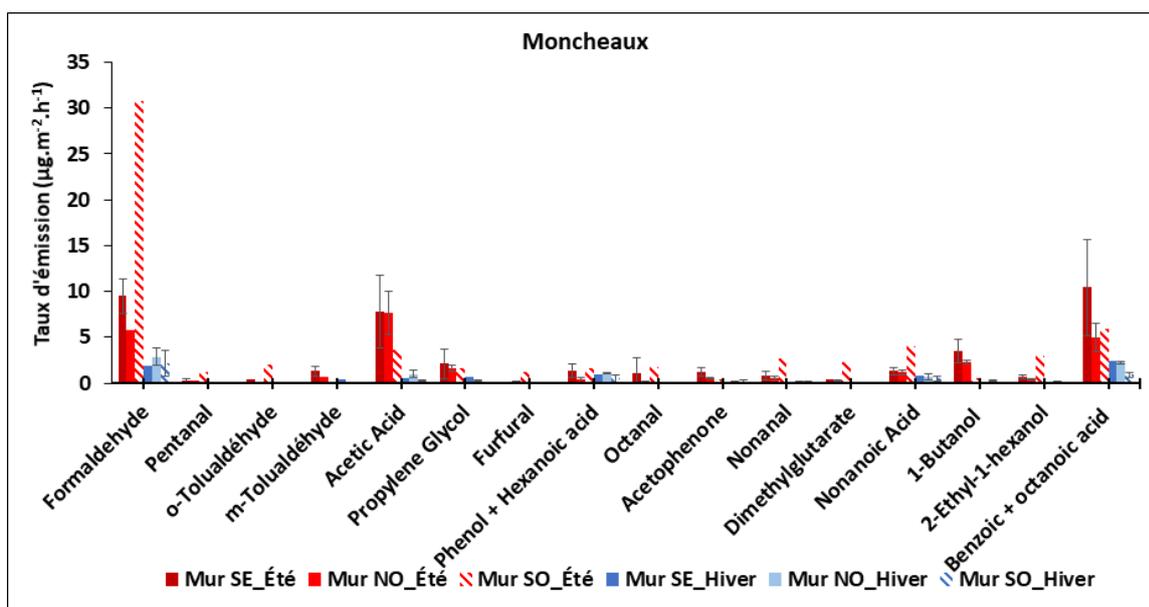


Figure 29: Emissions des différentes surfaces intégrant un isolant biosourcé sur le site de la mairie de Moncheaux en périodes estivale et hivernale (les barres d'erreurs représentent ± 1 écart-type si au minimum 3 mesures ont été réalisées). Source : IMT Nord-Europe

Un autre point qu'il est important de souligner est l'évolution des émissions des différents murs selon l'orientation de ces derniers. Il est ainsi possible de constater que les émissions du mur Sud-Ouest sont plus importantes que celles des autres murs pour une majorité d'espèces. Il est possible d'interpréter cette différence par le fait que cette orientation SO conduit à une exposition plus importante au soleil et donc à des variations de température vraisemblablement plus importantes.

Comparaison entre les émissions sur site et de matériaux seuls pour le site de Moncheaux

Une comparaison des émissions de COV à 50 % d'HR des matériaux individuels qui constituent les murs biosourcés à la mairie de Moncheaux (paragraphe 4) aux émissions hivernales et estivales sur site des 3 murs (paragraphe 6) a été faite. La figure 30 rassemble les composés majoritaires ($> 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) émis par les matériaux individuels et les composés majeurs émis sur site à Moncheaux. Comme le montre la figure 30, certains composés en commun ont été détectés tels que le formaldéhyde, le méthylglyoxal, l'acide acétique et le furfural qui sont émis par la laine de bois, en plus du phénol et de l'acide hexanoïque qui sont émis par le placoplâtre et l'acide benzoïque émis par le pare-vapeur. Cependant, les taux d'émissions de ces composés sont variables ; pour certains de ces composés ils sont plus élevés pour les matériaux individuels par rapport aux émissions sur site, tandis que pour d'autres, ils sont plus faibles.

Dans le cas où les taux d'émissions sur site sont plus faibles, l'interprétation la plus probable peut être associée à l'âge du bâtiment ; en effet, un vieillissement naturel des matériaux peut entraîner une diminution des taux d'émissions. Dans le cas où les émissions sur site sont plus importantes, une source associée à la mise en œuvre des matériaux peut être évoquée (peinture par exemple) ainsi que potentiellement des phénomènes de contamination liés à des activités diverses qui peuvent avoir eu lieu dans la pièce considérée.

Cependant, il est important de conclure sur le fait que seul le formaldéhyde et l'acide benzoïque ont été mesurés sur site à des taux d'émissions relativement importants ($> 5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) par rapport aux matériaux « natifs » associés aux murs biosourcés. Nous verrons dans la suite que pour ce qui concerne l'acide benzoïque, l'une des sources qui peut être évoquée est le plafond et la paroi dans une moindre mesure. Ce composé a été identifié dans la littérature comme pouvant être associé à l'utilisation de peinture [21].

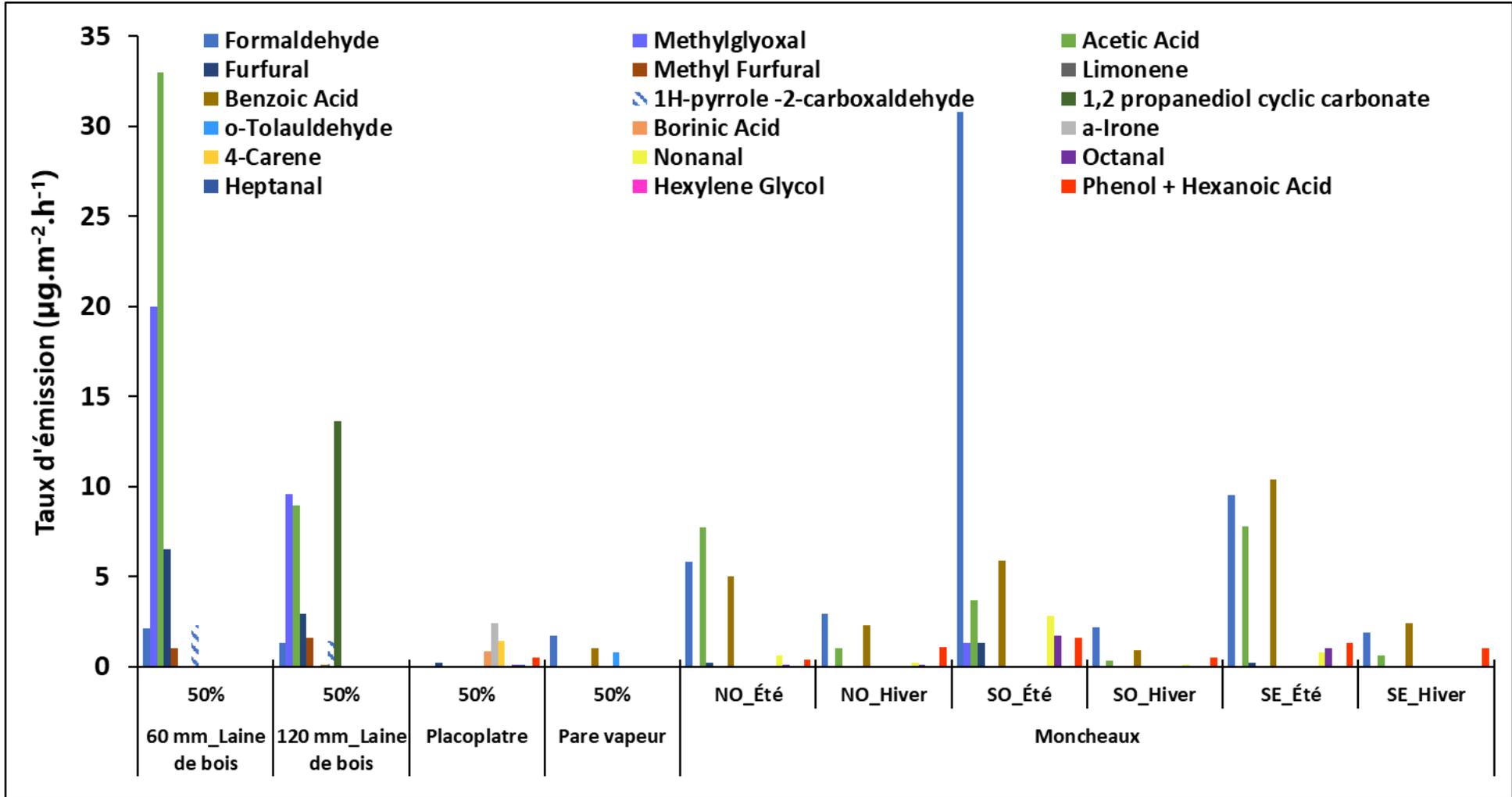


Figure 30: Émissions des différents matériaux constituant et des surfaces intégrant un isolant biosourcé sur le site de la mairie de Moncheaux en périodes estivale et hivernale (avec taux d'émissions > 1 µg.m-2.h-1 éq. toluène). Source : IMT Nord-Europe

6.1.2.3. Évolution des émissions de l'ensemble des surfaces

L'ensemble des résultats associés aux mesures d'émissions qui ont été conduites sur les différentes surfaces identifiées dans le site de Moncheaux est rassemblé dans le tableau 18. Ce tableau rassemble l'ensemble des espèces pour lesquelles au moins une surface présente un taux d'émissions supérieur à $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène.

Les mesures réalisées permettent de mettre clairement en évidence que quelle que soit la surface investiguée, les taux d'émissions sont systématiquement plus importants en été qu'en hiver même si selon les surfaces et les espèces les ratios d'évolution sont sensiblement différents. Ainsi en termes de COV totaux le ratio été/hiver varie de 2 pour la poutre, à plus de 7 pour le sol. Pour les trois murs intégrant l'isolant biosourcé, les ratios sont plus homogènes et varient entre 2,6 pour le mur orienté Nord-Ouest et 6,0 pour le mur orienté Sud-Ouest ; ce dernier est aussi le mur identifié comme présentant les taux d'émissions les plus importants.

Il est intéressant de souligner également que lors des deux campagnes, la surface la plus émissive a été le plafond. Le sol est apparu comme fortement émissif en période estivale alors qu'en période hivernale il peut être considéré comme relativement faiblement émissif.

Les trois murs intégrant l'isolant biosourcé ne présentent pas d'émissions de COV spécifique puisque les mêmes espèces peuvent être mesurées sur d'autres surfaces même si, bien évidemment, les taux d'émissions sont différents. Il est cependant très important de garder à l'esprit que la rénovation de cette pièce étudiée a été réalisée en 2013, soit plus de 9 ans, et que de très nombreuses contaminations croisées ont pu avoir lieu rendant particulièrement difficile le fait de qualifier les émissions spécifiques à une surface.

Tableau 18: Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) des COV émis des 8 surfaces évaluées en été et en hiver sur le site de Moncheaux. Source : IMT Nord-Europe

	Eté								Hiver							
	Paroi 1	Paroi 2	SE	SW	NW	Sol	Poutre	Plafond	Paroi 1	Paroi 2	SE	SW	NW	Sol	Poutre	Plafond
Formaldehyde	9.4	26.7	9.5	30.8	5.8	17.0	9.6	29.7	1.1	3.4	1.9	2.2	2.9	6.2	3.7	1.6
Pentanal	0.2	1.3	0.2	1.2	0.2	0.6	<LOD	1.7	0.1	0.2	<LOD	<LOD	0.1	0.3	0.2	0.7
Tolualdehyde	1.2	2.2	1.3	2.1	0.8	1.0	2.5	1.8	0.5	1.2	0.5	<LOD	<LOD	1.3	<LOD	<LOD
Acetic Acid	1.8	2.6	7.8	3.7	7.7	29.0	0.3	0.9	0.6	0.4	0.6	0.3	1.0	0.5	0.4	0.4
Propylene Glycol	<LOD	1.5	2.1	1.6	1.6	1.0	0.2	1.3	0.3	0.3	0.7	<LOD	0.3	0.3	0.1	1.1
Furfural	0.1	0.6	0.2	1.3	0.2	0.4	<LOD	1.4	0.1	0.1	<LOD	<LOD	<LOD	0.1	<LOD	<LOD
Phenol + Hexanoic Acid	0.2	1.3	1.3	1.6	0.4	1.6	2.6	3.3	0.9	0.5	1.0	0.5	1.1	1.7	1.8	4.6
Octanal	0.1	0.4	1.0	1.7	0.1	0.7	0.4	2.4	0.2	0.1	<LOD	<LOD	0.1	<LOD	0.2	0.8
Acetophenone	1.3	0.8	1.3	0.5	0.6	2.1	0.1	0.6	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3
Nonanal	0.6	0.8	0.8	2.8	0.6	2.4	0.3	3.4	0.5	0.3	<LOD	0.1	0.2	<LOD	0.4	1.4
Dimethylglutarate	0.4	1.3	0.4	2.2	0.3	0.6	8.7	6.2	<LOD	<LOD	0.1	<LOD	0.1	0.1	0.1	1.3
Nonanoic Acid	2.4	1.5	1.3	4.0	1.2	1.1	4.1	14.1	0.5	0.4	0.8	0.5	0.7	0.3	1.3	2.0
1-Butanol	1.2	0.5	3.5	0.6	2.3	1.3	0.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1
2-Ethyl-1-hexanol	0.7	0.9	0.7	2.9	0.4	1.0	0.3	9.7	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	4.9
Benzoic + Octanoic Acids	14.5	1.3	10.4	5.9	5.0	8.5	0.3	15.6	1.2	0.9	2.4	0.9	2.3	2.5	2.9	4.8
Phthalate	4.3	0.4	3.0	0.1	2.2	3.7	7.7	1.8	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
TVOC*	61.4	25.2	51.7	73.1	37.2	101	41.3	131	12.2	8.1	16.8	12.1	14.5	14.2	20.9	51.7

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

6.1.3. Caractérisation des concentrations ambiantes du site n°1

6.1.3.1. Mesures en continu sur 2 semaines

La campagne de mesure d'hiver à Moncheaux s'est déroulée du 27 janvier au 8 février 2020 selon la méthodologie précisée en [Annexe 5](#).

La campagne d'été s'est déroulée du lundi 8 au vendredi 19 juillet 2019. Les résultats sont délicats d'interprétation en raison de la chaleur, notamment parce qu'en période diurne, certaines fenêtres sont restées ouvertes pour permettre le refroidissement des instruments. Les résultats en période nocturne sont alors les plus représentatifs de l'influence que peut avoir le bâti au niveau des concentrations ambiantes.

Les résultats des tubes passifs sont résumés dans le tableau suivant. Les résultats des doublons ont été moyennés pour un écart constaté d'environ 5 %, montrant une bonne reproductibilité des mesures.

Tableau 19: Résultats des tubes passifs sur les 2 campagnes été et hiver réalisées sur le site n°1. Source : Cerema

Composés	Campagne d'hiver				Campagne d'été			
	Semaine 1		Semaine 2		Semaine 1		Semaine 2	
En µg/m ³	Centre	Coin	Centre	Coin	Centre	Coin	Centre	Coin
Formaldéhyde	17,2	19,7	13,6	15,2	20,6	20,6	30,2	30,6
Acétaldéhyde	16,8	16,4	16,5	17,9	9,5	9,2	11,8	11,7
Propanal	3,2	3,6	3,5	3,8	2,4	2,5	2,9	2,8
Butanal	11,1	12,0	8,3	9,3	9,4	9,8	11,8	11,7
Benzaldéhyde	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1	1,1	1,5	1,5
Valéraldéhyde	3,4	3,5	2,6	2,8	5,5	5,5	7,7	7,6
Hexanal	10,7	11,2	7,4	7,6	21,8	22,0	32,8	32,4

Les concentrations en acroléine et isovaléraldéhyde sont restées inférieures aux limites de détection.

Les résultats du GC Companion sont délicats d'interprétation. L'un des chromatogrammes les plus nets est représenté ci-dessous. Pris le 11 juillet 2019 à 6h30, en toute fin de nuit, il présente les pics les plus distincts, ici numérotés de 1 à 11 en fonction du temps d'élution du composé. Ces pics sont les seuls à être retrouvés sur suffisamment de chromatogrammes pour que l'on puisse en suivre l'évolution d'une manière un tant soit peu significative. On rappelle que l'aire du pic est proportionnelle à la concentration du composé détecté, et le temps d'élution tend à croître avec la taille de la molécule détectée. L'analyse commence à la 22^{ème} minute du cycle du GC (après la phase de pompage).

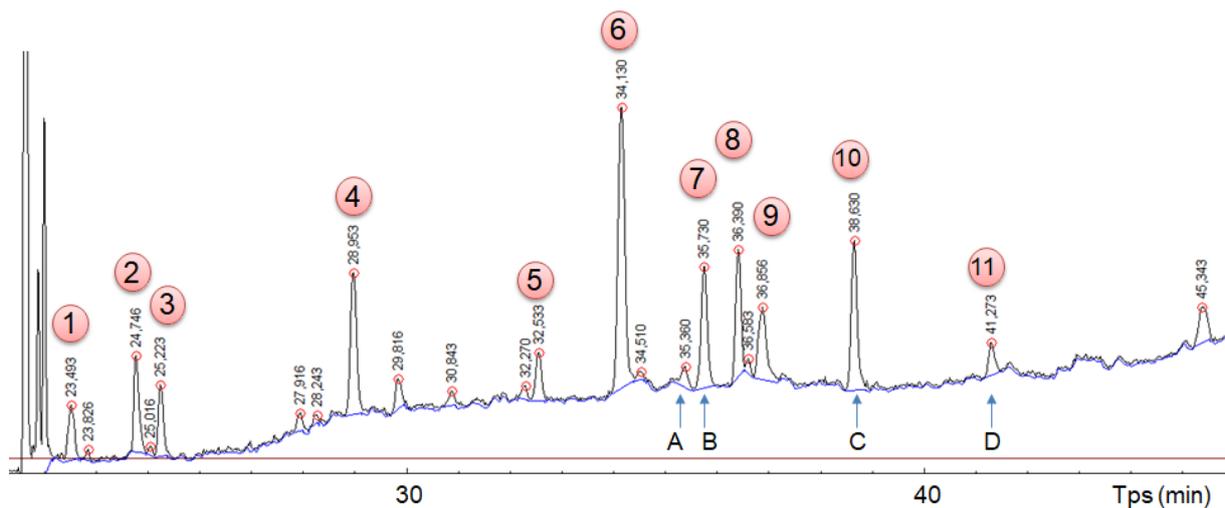


Figure 31: Chromatogramme du 11 juillet 2019 à 6h30. Les pics notés A, B, C et D ont ceci de particulier qu'ils augmentent le jour et diminuent la nuit, contrairement aux autres. Source : Cerema

L'identification des pics est une problématique délicate, notamment en raison de la sensibilité constatée relativement faible pour les COV recherchés de l'instrument et de son incapacité à discriminer des composés de temps d'éluion similaires (un pic peut donc correspondre à plusieurs composés proches, et certains composés peuvent ne pas être détectés). Il a donc été nécessaire de faire appel aux autres résultats mesurés en laboratoire pour étiqueter les pics en diminuant l'incertitude sur leur identification. Par ailleurs, le formaldéhyde n'est pas quantifié car, trop léger, il se confond avec le bruit en début de chromatogramme (avant le pic 1).

Ci-dessous en figure 32, sont tracées les évolutions des concentrations sur les deux nuits les plus lisibles de la campagne d'été (du 10 au 12 juillet 2019). L'unité non-standard est due à l'étalon choisi parmi les COV jugés les plus probables en début de projet lors de l'exploration bibliographique.

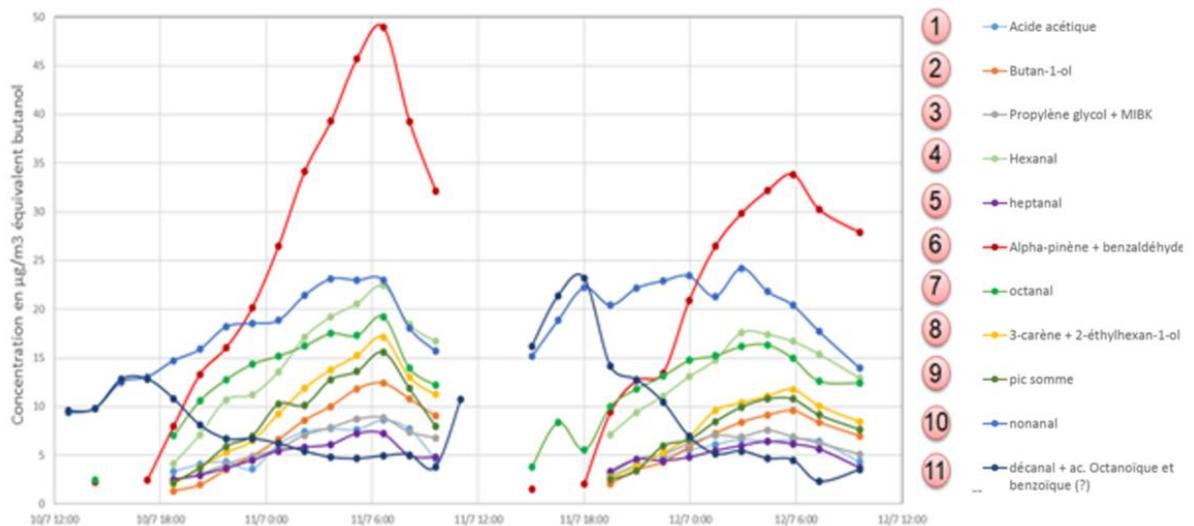


Figure 32: Graphique représentant l'évolution des concentrations de 11 COV suivis par le GC sur deux nuits. L'alpha-pinène est nettement majoritaire, suivi de l'acide acétique. Source : Cerema

On note que la concentration de la plupart des composés (*a priori* ceux issus du bâti ou du mobilier) augmente pendant la nuit, une tendance que l'on retrouve nettement sur les données des balises environnementales.

Les chromatogrammes obtenus en période hivernale ont présenté des concentrations presque toutes inférieures à la limite de détection des composés (évaluée proche de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en équivalent butanol). L'expérience acquise en été a toutefois

permis de recueillir les données sur un week-end, on reconnaît alors que chaque pic identifiable en fin de week-end en hiver correspond à un pic suivi en été, ce qui montre une certaine continuité et cohérence entre les deux campagnes.

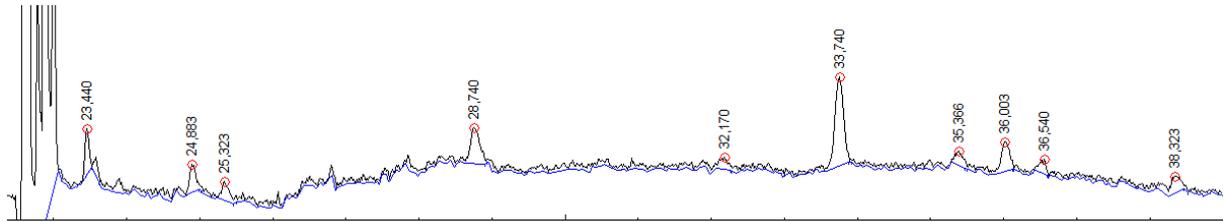


Figure 33: Chromatogramme du 3 mars 2020 vers 6h, en fin de week-end, le plus net de la campagne d'hiver. Les temps d'éluion (en min) tiennent lieu d'échelle. Source : Cerema

Les données recueillies par les balises sont moins précises pour ce qui concerne la nature des composés détectés, mais d'une bien meilleure résolution en temps, ce qui permet d'étudier l'évolution des concentrations avec une bonne précision. Ci-dessous en figure 34, le suivi pendant les 15 jours de la campagne d'été de tous les paramètres relevés par la balise Fireflies :

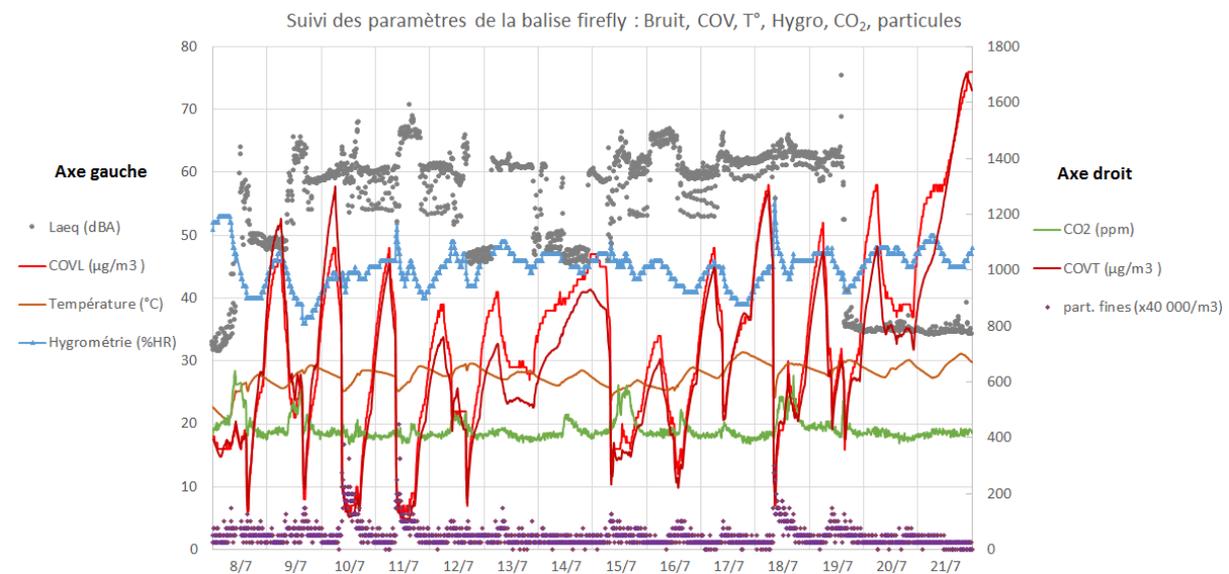


Figure 34: Graphique représentant l'évolution des paramètres suivis par la balise environnementale Fireflies au cours de la campagne d'été à Moncheaux. Source : Cerema

On note une forte corrélation entre COV légers et COV totaux, les deux courbes sont très cohérentes. Les courbes des COV ont une périodicité quotidienne très marquée. Les montées correspondent aux nuits (de 18 h à 6 h environ), lorsque les réduits de ventilation dissipent moins efficacement les COV émis par le bâti et le mobilier. Les pics sont atteints au petit matin, aux alentours de 6 h, avant que la ventilation ne retrouve les horaires de jour. On note l'absence de redescente le 14 juillet, la ventilation étant visiblement restée en mode réduit pour un jour férié. Les poussières sont restées à un niveau faible, et sont corrélées à l'activité humaine (repérée par les hausses de CO₂). Le niveau sonore aurait pu constituer une indication supplémentaire de présence humaine, mais il est effectivement noyé dans le bruit de fond dû aux instruments de mesure (retirés pour la plupart le 19 juillet). L'hygrométrie est inversement liée à la température : elle tend à augmenter lorsque la température redescend, conformément au comportement attendu.

De tous ces paramètres, seuls les plus pertinents sont conservés pour la suite de l'étude : niveaux de CO₂ (comme indicateurs de présence humaine) et concentrations en COV (légers et totaux), de manière à faciliter les comparaisons.

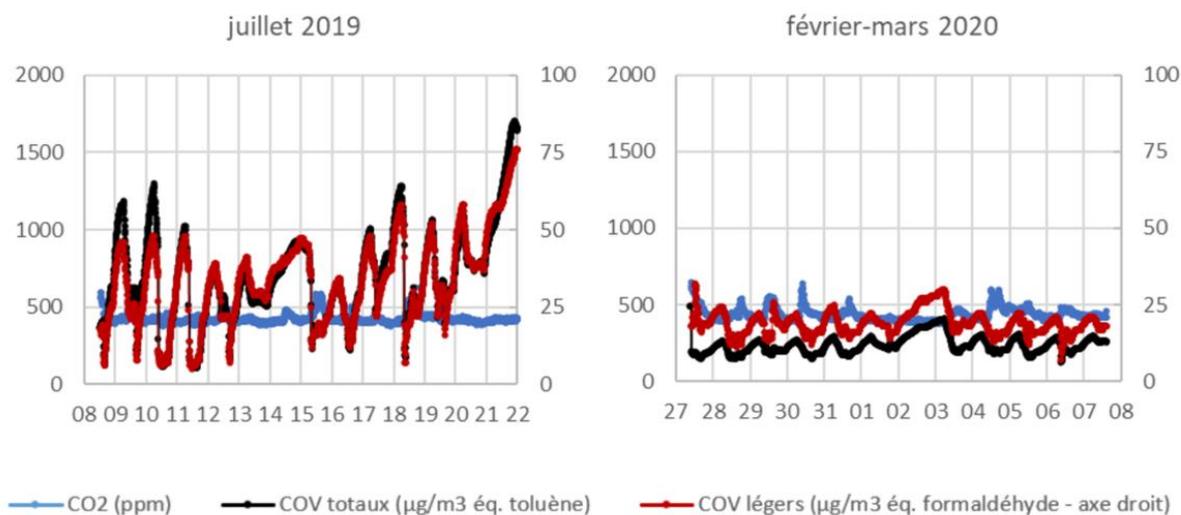


Figure 35: Comparaison des deux campagnes (été/hiver) réalisées à Moncheaux. Evolution des concentrations en COV légers, totaux, et CO₂ mesurés par la balise Fireflies. Source : Cerema

La mise en parallèle des résultats en hiver et en été met en évidence une baisse marquée des émissions. La périodicité est gardée, mais les niveaux relevés en hiver sont 4 à 5 fois inférieurs à ce que l'on constate en été sur le site n°1. La baisse relevée est plus marquée encore sur les COV totaux que sur les COV légers.

6.1.3.2. Évolution spéciée des COV sur 24h

L'ensemble des résultats obtenus lors des prélèvements réalisés du 18 au 19 juillet 2019 et du 4 au 5 février 2020, et permettant le suivi sur 24h des concentrations ambiantes en COV supérieures à 1 µg.m⁻³, est présenté en [Annexe 6](#). Environ 30 composés avec une concentration supérieure à 1 µg.m⁻³ ont été quantifiés dans l'air intérieur à Moncheaux en été et en hiver. Les mêmes composés mesurés dans l'air intérieur en été ont également été détectés en hiver, la majorité de ces composés étant des aldéhydes et des cétones.

Dans un premier temps, les évolutions des quelques COV sélectionnés pour être représentatifs de chacun des surfaces ont été présentés. Ainsi sur les figures 36 et 37, le nonanal, le propylène glycol et le furfural, ont été rassemblés comme représentatifs pour les murs biosourcés, l'acide acétique pour le sol, l'acide nonanoïque et le phénol coélués avec l'acide hexanoïque représentatifs pour le plafond, le 1-butanol coélué avec le benzène pour les parois, le phénol coélué avec l'acide hexanoïque pour la poutre et la formaldéhyde émis par toutes les surfaces.

Il est important de noter que pour la campagne menée en période estivale, pour 4 des 8 prélèvements réalisés pour le suivi des concentrations sur 24 heures, les cartouches permettant la mesure des COV carbonylées n'ont pas eu lieu et par conséquent la quantification du formaldéhyde n'a pas été possible.

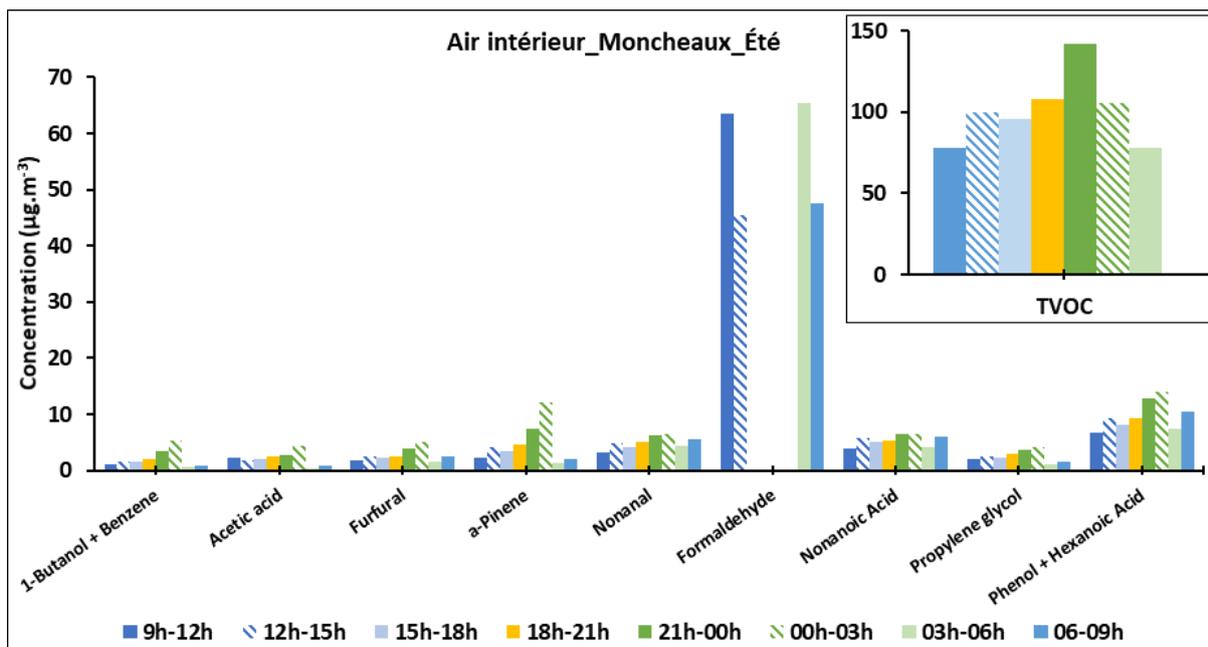


Figure 36: Évolutions temporelles sur 24h des concentrations en quelques COV (durées de prélèvement intégrées de 3 heures) les 18 et 19 juillet 2019 sur le site de la mairie de Moncheaux. Source : IMT Nord-Europe

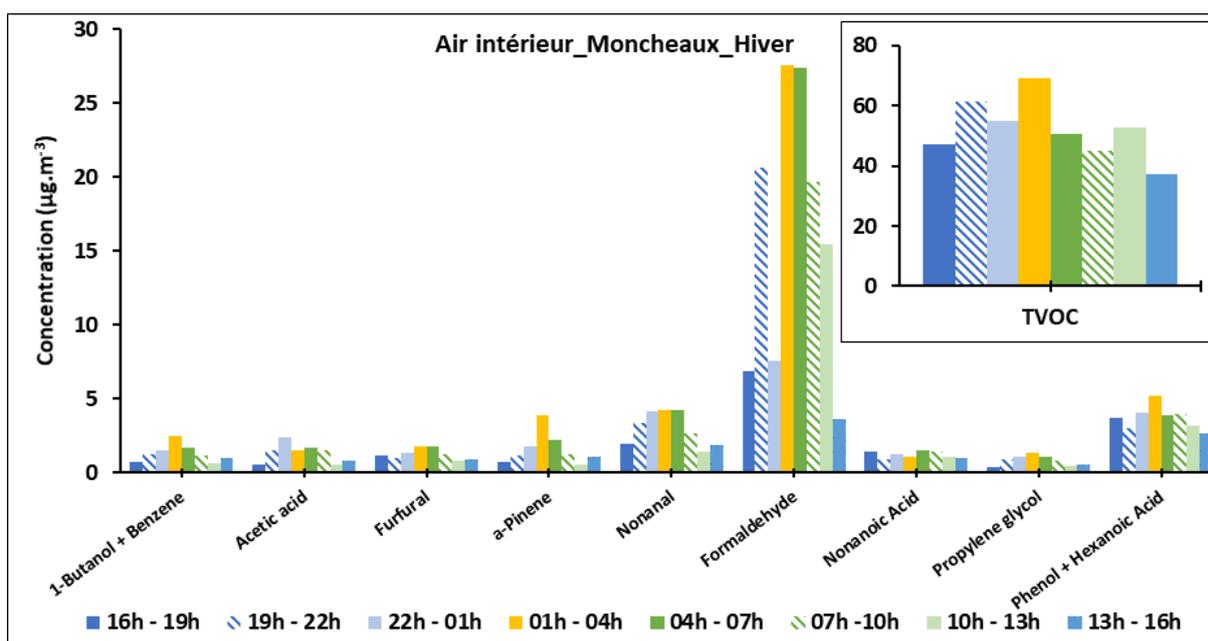


Figure 37: Évolutions temporelles sur 24h des concentrations en quelques COV (durées de prélèvement intégrées de 3 heures) les 4 et 5 février 2020 sur le site de la mairie de Moncheaux. Source : IMT Nord-Europe

Pour l'ensemble de ces espèces, les concentrations augmentent de manière significative pendant la nuit. Ceci est en accord avec ce qui est généralement observé pour les espèces associées à des émissions issues du bâti ou du mobilier puisqu'en période nocturne le taux de renouvellement d'air est diminué, conduisant à une augmentation des concentrations de ces espèces.

Il est important de noter que les concentrations ambiantes en période hivernale sont également sensiblement plus faibles que celles mesurées en période estivale. Cette observation est en bon accord avec les évolutions des émissions des différentes surfaces présentées précédemment.

6.1.3.3. Mise en regard des concentrations mesurées en air intérieur et émissions surfaciques mesurées pour quelques COV

Afin de mettre en regard les COV majoritairement émis par les différentes surfaces et quelques COV majoritaires quantifiés en air intérieur, les figures 38 et 39 rassemblent les concentrations moyennes de 8 espèces mesurées en période estivale et hivernale et les émissions cumulées des différentes surfaces en prenant en compte les taux d'émissions moyens mesurés pour chacune des surfaces. Les figures 38 et 39 présentent respectivement les résultats des campagnes estivale et hivernale. Il est important d'être vigilant quant à la comparaison directe des taux d'émissions des différentes surfaces : en effet, les taux sont exprimés par unité surfacique ($/m^2$) alors que les différentes surfaces sont de tailles très différentes et que pour aller plus loin dans l'interprétation, il conviendrait de pondérer les taux d'émissions surfaciques par les aires respectives des différentes surfaces. Ainsi à titre d'exemple le sol représente une surface d'environ 86 m^2 alors que la paroi 1 donnant sur le local technique ne représente que 27 m^2 environ, rendant donc le poids en termes d'émissions du sol environ 3 fois supérieur à celui des poutres. Ce calcul n'a pas été réalisé de par son caractère chronophage d'une part et des incertitudes liées aux relevés de surface *in situ* d'autre part.

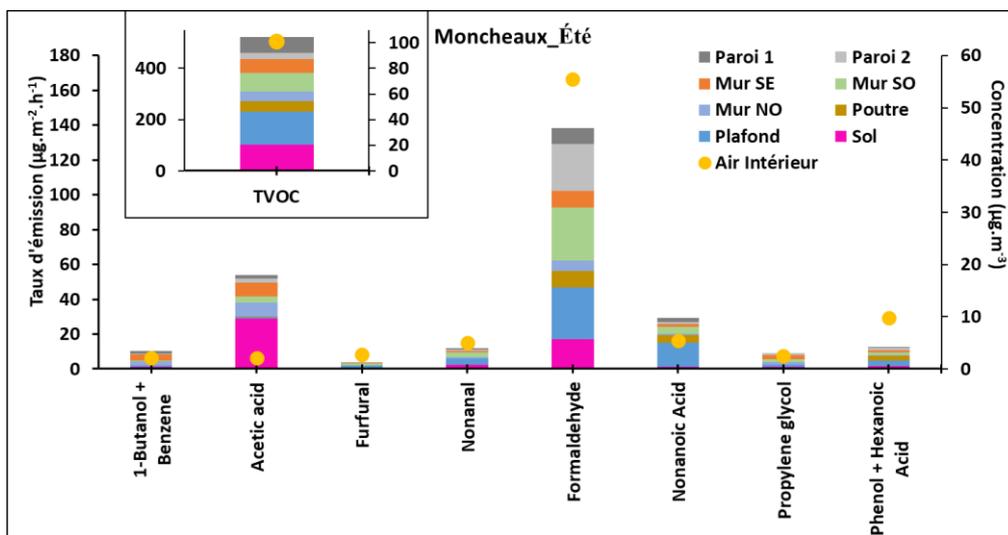


Figure 38: Mise en regard des émissions des différentes surfaces (axe des ordonnées gauche) et des concentrations mesurées en air intérieur (axe des ordonnées droit) sur le site de la mairie de Moncheaux lors de la campagne estivale.

Source : IMT Nord-Europe

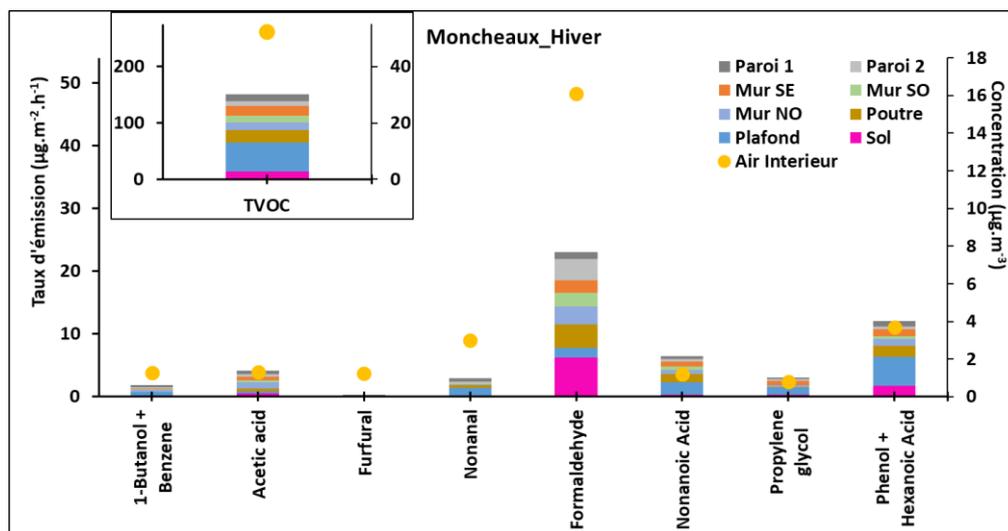


Figure 39: Mise en regard des émissions des différentes surfaces (axe des ordonnées gauche) et des concentrations mesurées en air intérieur (axe des ordonnées droit) sur le site de la mairie de Moncheaux lors de la campagne hivernale.

Source : IMT Nord-Europe

Au travers de ces quelques exemples, il est possible de constater qu'il n'y a pas de lien direct entre les émissions des différentes surfaces et les concentrations ambiantes et que les déterminants des concentrations en COV en air intérieur sont multiples et complexes. En effet, si pour le formaldéhyde il est aisé de constater qu'il s'agit d'une espèce majoritairement émise par toutes les surfaces et qu'il peut être considéré comme également l'espèce majoritairement mesurée en termes de concentration moyenne pendant les 24 heures de mesures de l'air ambiant, le lien est cependant beaucoup moins évident pour d'autres espèces. Ainsi, pour phénol + acide hexanoïque, les émissions quantifiées restent du même ordre de grandeur lors des deux campagnes (12,3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ en été et 12,1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ en hiver) tandis que les concentrations mesurées en air ambiant sont sensiblement différentes : de l'ordre de 3,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne en hiver et 9,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en été. Les interprétations peuvent être multiples : sources intérieures non identifiées, phénomènes d'adsorption² aux surfaces pour certaines espèces émises, apport de sources extérieures ou associées aux activités des occupants... et il n'est pas possible avec aussi peu de mesures spéciées en air ambiant pour pouvoir interpréter plus finement les concentrations observées.

6.1.3.4. Caractérisation des micro-organismes en lien avec les conditions environnementales

Pour les campagnes de mesure de la concentration microbiologique de l'air dans les bâtiments sélectionnés pour cette étude, différents milieux de culture gélosés ont été choisis afin de pouvoir représenter les populations fongiques et bactériennes. Le tableau 20 présente les 7 milieux utilisés dans cette étude. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'un impacteur mono plateau Mass 100 ayant un débit de 100 L/min (figures 40 et 41). La durée d'échantillonnage a été fixée à 5 min correspondant à un volume de 500 L. Les boîtes de petri contenant les milieux gélosés ont été incubées à 25 °C pendant 4 à 5 jours avant dénombrement (figure 41).

Deux campagnes ont été réalisées : la première, estivale, les 10 et 11 juillet 2019 et la seconde, printanière, les 29 et 30 mars 2020.

Tableau 20: Caractéristiques des milieux de culture utilisés. Source : IMT Atlantique

Gélose Czapek Dox	Majoritairement pour le développement des moisissures qui utilise le nitrate de sodium comme source d'azote
Gélose à l'extrait de malt (MEA)	Pour le dénombrement des levures et des moisissures
Gélose au Dichloran Rose Bengale Chloramphénicol (DRBC)	Milieu sélectif favorisant la croissance des levures et des moisissures (inhibition bactérie et évite l'étalement des colonies) aw 0,95 et plus
Gélose au Dichloran-Glycerol (DG18)	Milieu sélectif à faible activité de l'eau (aw) pour la recherche de moisissures xérophiles
Gélose Chapman	Bactéries Halophiles et plus particulièrement fermentant le mannitol
Gélose R2A (Reasoner's 2A Agar)	Pour le développement de bactéries inhibées sur des milieux organiques riches
Gélose ordinaire	Milieu non sélectif pour l'isolement des bactéries aérobie mésophile et dans une moindre mesure des moisissures.

² L'adsorption est un phénomène où une espèce se fixe à la surface d'autres molécules. Ce phénomène est la plupart du temps réversible (désorption) et ne doit pas être confondu avec le phénomène d'absorption où l'espèce pénètre dans la molécule.



Figure 40: Mass 100 en condition d'échantillonnage.
Source : IMT Atlantique



Figure 41: Exemple de réponse sur gélose MEA (fongique).
Source : IMT Atlantique

Les résultats obtenus lors des 2 campagnes de prélèvement et de mesure sont regroupées dans le tableau 21. Les valeurs obtenues montrent que les concentrations en aérosols microbiens de l'air de la salle des mariages de la mairie de Moncheaux sont en accord avec les valeurs guides présentées dans l'article de Brauner *et al.* [22] (tableau de l'Annexe 4). De plus, les prélèvements proches des murs nord ou sud sont de même niveau. Enfin, les prélèvements de la période estivale présentent des concentrations plus élevées en microorganismes. Les valeurs élevées mesurées le 11 juillet peuvent s'expliquer par le fait que la porte de la salle est restée ouverte du fait d'une température intérieure élevée et correspond à l'influence de l'air extérieur.

Tableau 21: Résultats des 2 campagnes de mesure des aérosols microbiens (nd = non déterminé, AM = matin ; PM = après midi). Source : IMT Atlantique

Mur	10_07_19	10_07_19	11_07_19	29_03_20		29_03_20	30_03_20
	AM	PM	PM	AM		PM	AM
	Nord	Nord	Nord	Nord	Sud	Nord	Nord
	UFC /m ³						
Gélose ordinaire	340	200	1232	102-116	122	42-68	78-152
Gélose R2A	148	78	1672	90-110	98	68-98	88-122
Gélose Chapman	50	44	46	8-16	18	8-10	10-18
Gélose MEA	nd	nd	400	70-72	68	56-106	42-86
Gélose Czapek	322	184	1610	52-88	50	32	50-56
Gélose DRBC	42	28	50	4-46	12	12-22	8-12
Gélose DG 18	366	188	762	100-106	52	16-34	40-148

6.2. Bâtiment 2 – bâtiment récent conçu en matériaux biosourcés – le groupe scolaire

6.2.1. Synthèse du diagnostic bâtiment du site n°2

Le diagnostic n'a pas révélé de source de pollution extérieure déterminante et peu de sources de polluants intérieurs. Néanmoins, il convient également sur ce site d'apporter une attention particulière aux produits d'entretien réellement utilisés (enlever les produits non utiles et limiter au *maximum* les mélanges, limiter l'utilisation de pulvérisateur au profit de chiffons humides, limiter voire supprimer l'utilisation de javel et de désodorisants, etc.).

La CTA n°1, en revanche fonctionne à moins de 50 % de sa capacité maximale, ce qui amène à des débits très inférieurs aux débits attendus par la réglementation (RSDT et Code du Travail). L'approche purement énergétique semble être très défavorable à celle de la QAI. Il convient également de veiller à un bon équilibrage des débits car des débits très disparates ont pu être relevés sur place. Le fonctionnement de la CTA n°2 devra également être vérifié.

L'entretien des CTA est réalisé sous contrat avec une entreprise d'exploitation / maintenance régulièrement. Il est conseillé, en plus de cet entretien régulier, de faire réaliser tous les 5 ans un nettoyage des gaines, notamment des gaines de soufflage, afin d'assurer une bonne qualité de l'air entrant dans chacune des 2 CTA.

Le diagnostic détaillé est repris en [Annexe 2](#).

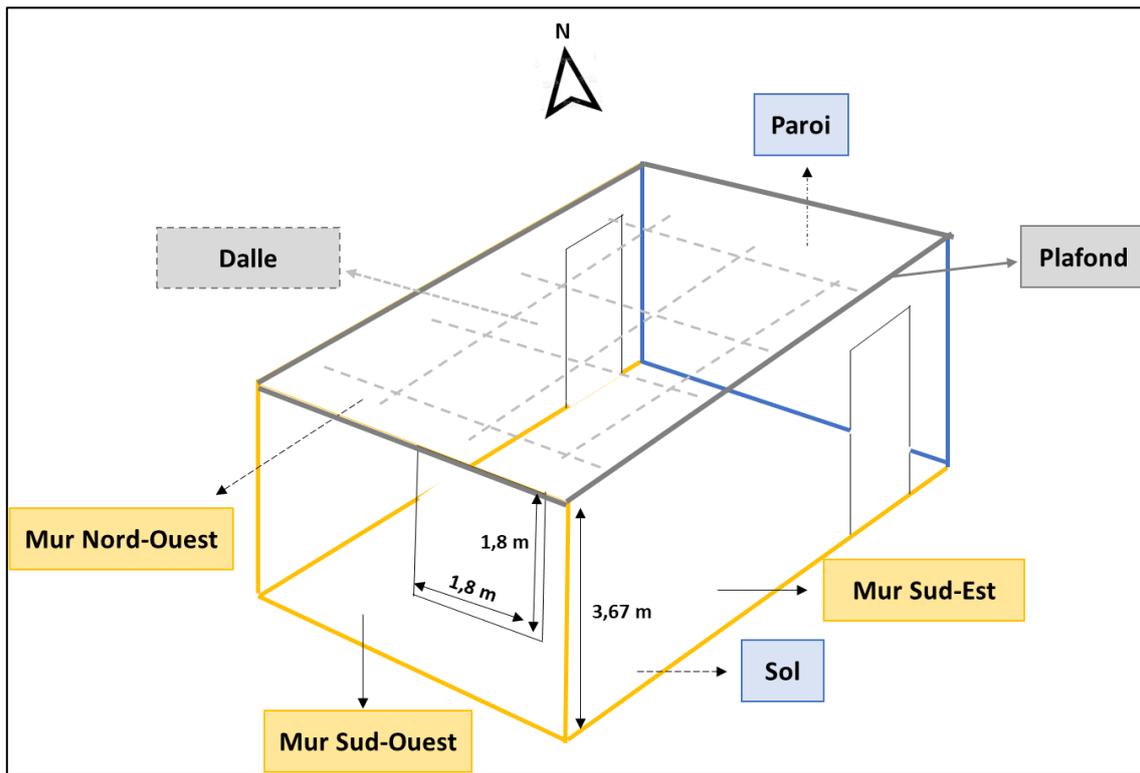


Figure 42: Présentation schématique de l'atelier du groupe scolaire et repérage des différentes surfaces dont les émissions sont mesurées. Source: IMT Nord-Europe

6.2.2. Mesures en surfaces du site n°2

6.2.2.1. Mur biosourcé: évolution hygrothermique annuelle et évolution des émissions sur 24h

Les capteurs ont été mis en place dans la pièce « Atelier 07/08 » située au 1^{er} étage du groupe scolaire. La paroi instrumentée a la particularité de comporter une lame d'air de 200 mm derrière la plaque de plâtre intérieure. Les capteurs sont des thermo-hygromètres de la marque Vaisala, de type HMP 60, leur positionnement dans la paroi est le suivant :

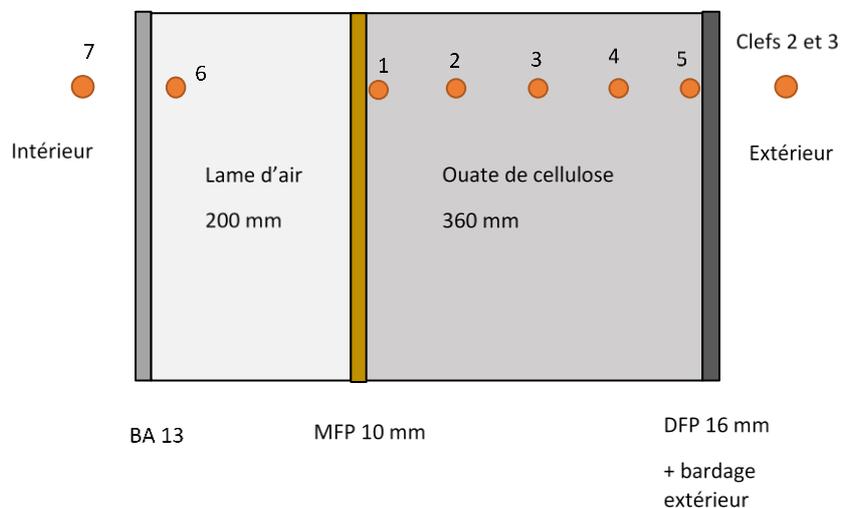


Figure 43: Positionnement des thermo-hygromètres au sein de la paroi. Source : Université d'Artois

Les thermo-hygromètres sont espacés de 9 cm dans la ouate de cellulose (n° 1-2-3-4-5 de l'intérieur vers l'extérieur), le capteur n°6 est placé dans la lame d'air, le capteur n°7 est placé dans la salle, 2 thermo-hygromètres autonomes ont été placés à l'extérieur.

L'humidité spécifique HS (kg eau/kg air sec) a été calculée à partir des mesures de température et d'humidité relative, en supposant la pression égale à 101325 Pa.

Les courbes présentées ci-après montrent les évolutions des humidités relatives, des températures et des humidités spécifiques sur 24 h, en été le 15/07/2020 et en hiver le 30/01/2020. Ces deux dates correspondent aux campagnes de mesures réalisées *in situ*.

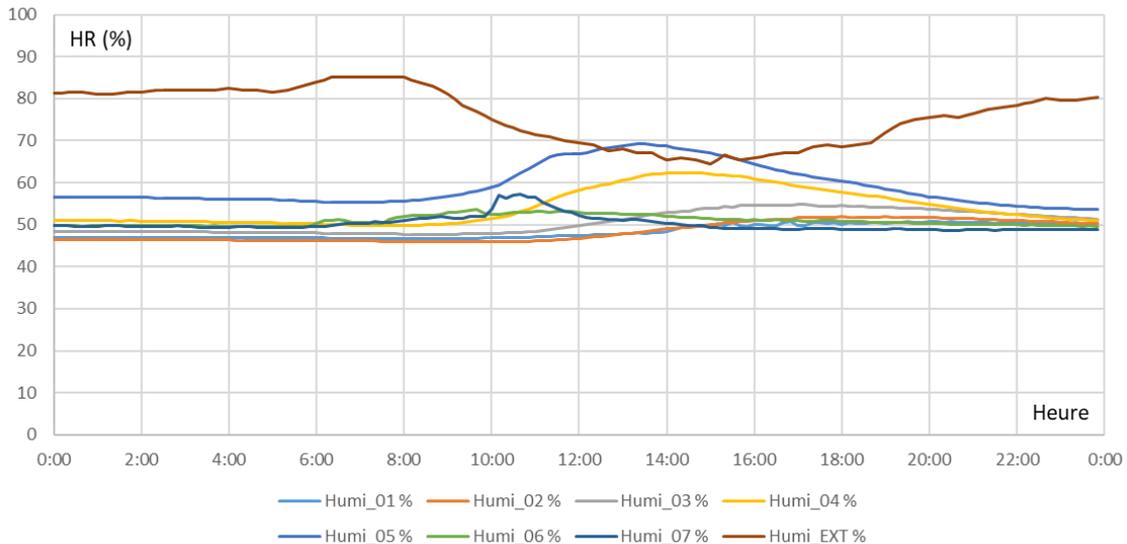


Figure 44: Évolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi le 15/07/2020. Source : Université d'Artois

En été, les faibles écarts de températures entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment font que les valeurs d'humidité relative se regroupent dans un faisceau de courbes assez resserré. Les principales valeurs sont comprises entre 40 % et 60 % (aucun risque de condensation), le capteur positionné entre l'isolant et le DFP de 16 mm est plus influencé par les variations de températures extérieures, ce qui influence la valeur d'humidité relative à cet endroit.

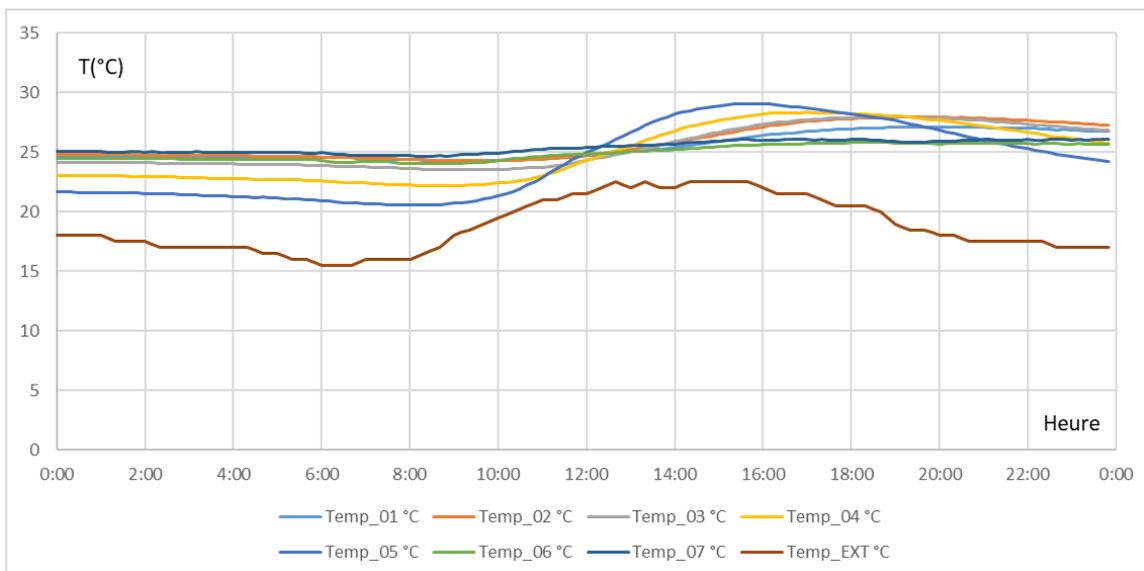


Figure 45: Évolution de la température T(°C) dans l'épaisseur de la paroi le 15/07/2020. Source : Université d'Artois

Les valeurs de l'humidité spécifique HS (kg eau /kg air sec) calculées montrent d'importantes variations sur une période de 24 h en un même point de mesure, entre 0.008 kg eau /kg air sec et 0.017 kg eau /kg air sec. Ceci est lié au système constructif et à la composition spécifique de la paroi.

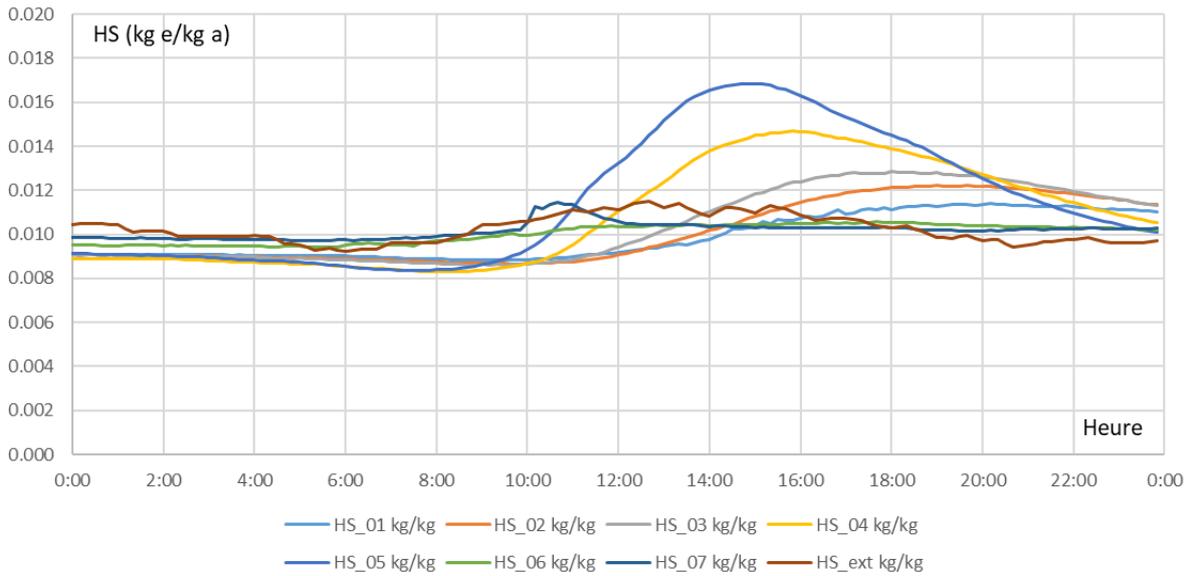


Figure 46: Évolution de l'humidité spécifique HS (kg d'eau / kg air sec) dans l'épaisseur de la paroi le 15/07/2020. Source : Université d'Artois

En hiver, les écarts de températures entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment sont plus importants, environ 16 °C au sein de la paroi. Les fortes amplitudes de températures mesurées à l'interface isolant/DFP 16 mm s'expliquent par l'orientation sud-est de la paroi et sa faible inertie. La façade est directement ensoleillée dès le lever du jour, le rayonnement solaire direct sur le bardage influence les premiers centimètres d'isolation de la paroi. Les valeurs d'humidités relatives sont influencées et varient entre HR=30 % et HR=80 % environ. La saturation n'est pas atteinte, il n'y a pas de risque de condensation (HR = 100 %) au sein de la paroi. Dans l'air extérieur par contre, on s'approche de la saturation HR=90 % (températures plus faibles). Concernant l'humidité spécifique, on observe de grandes amplitudes sur 1 journée en un même point, entre 0.0035 kg eau /kg air sec et 0.016 kg eau /kg air sec.

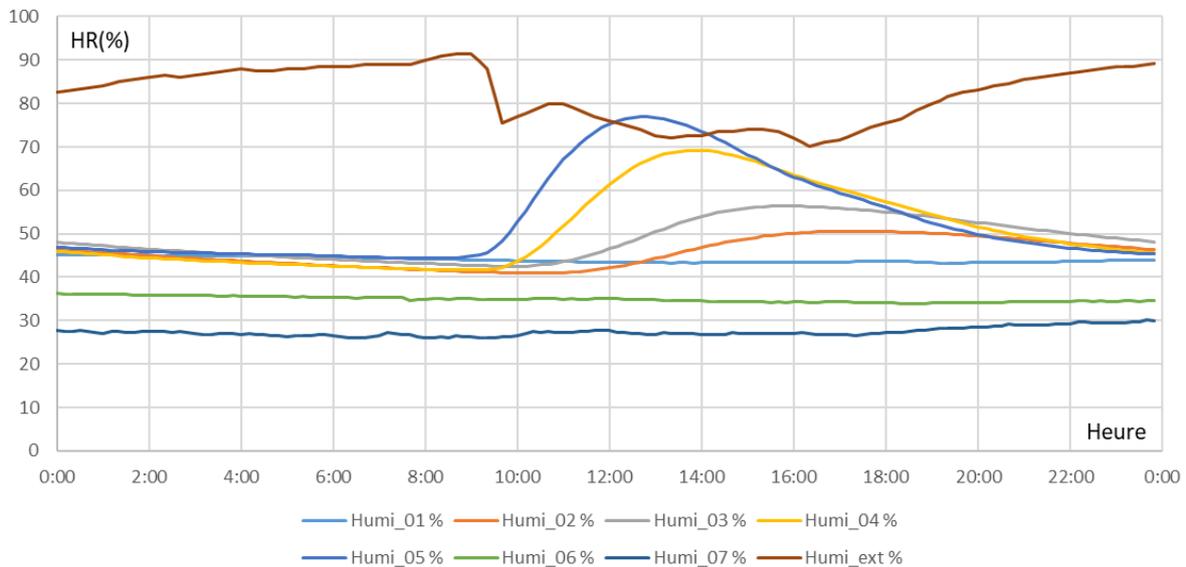
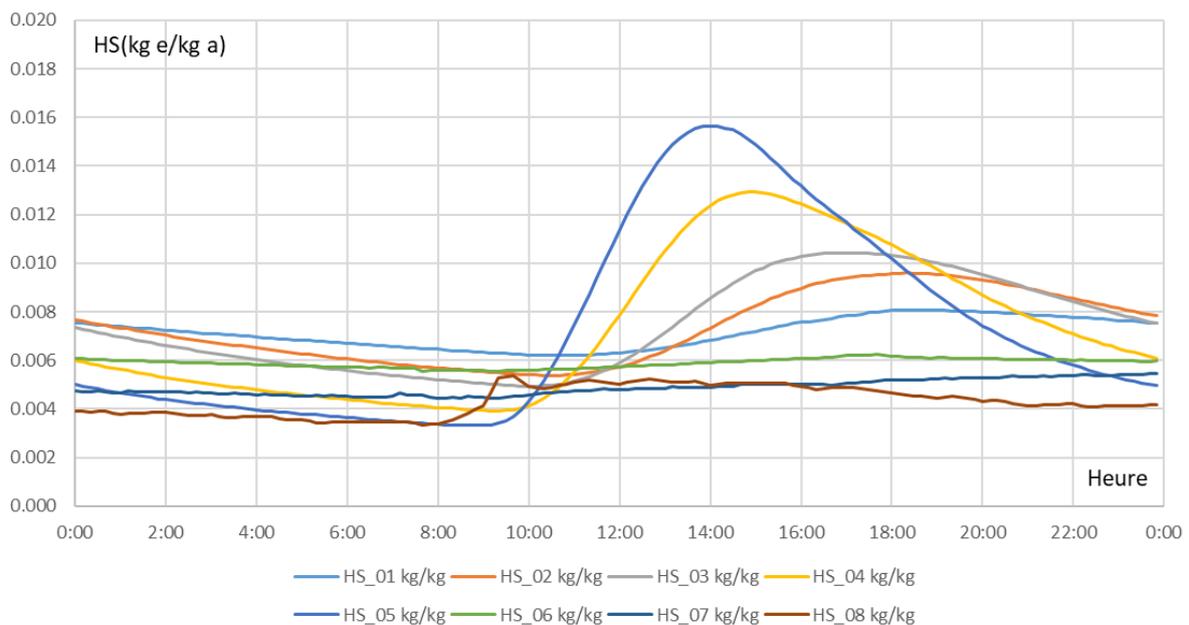
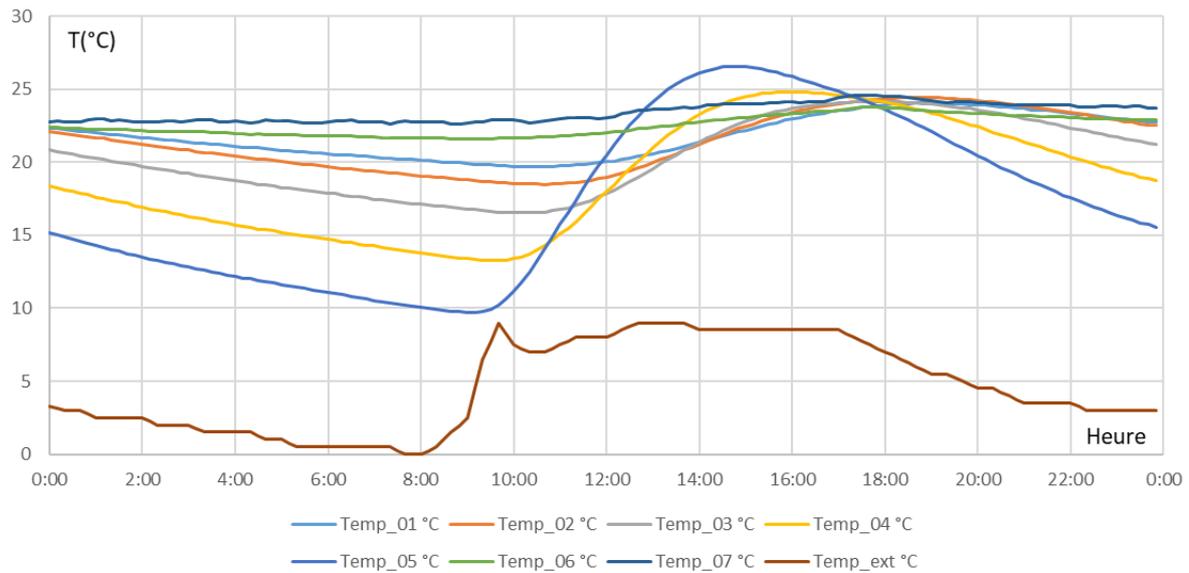


Figure 47: Évolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi le 27/02/2021. Source : Université d'Artois



Les figures suivantes montrent les évolutions annuelles des températures, humidités relatives et spécifiques du 03/02/2021 au 31/03/2022. On observe que les mesures à l'interface isolant/paroi extérieure sont les plus bruitées du fait de la faible inertie thermique de la paroi extérieure. L'exposition sud-est explique également les fortes variations d'amplitudes pour les différentes grandeurs. Les mesures faites à l'extérieur ne sont pas présentées ici pour faciliter la lisibilité des courbes.

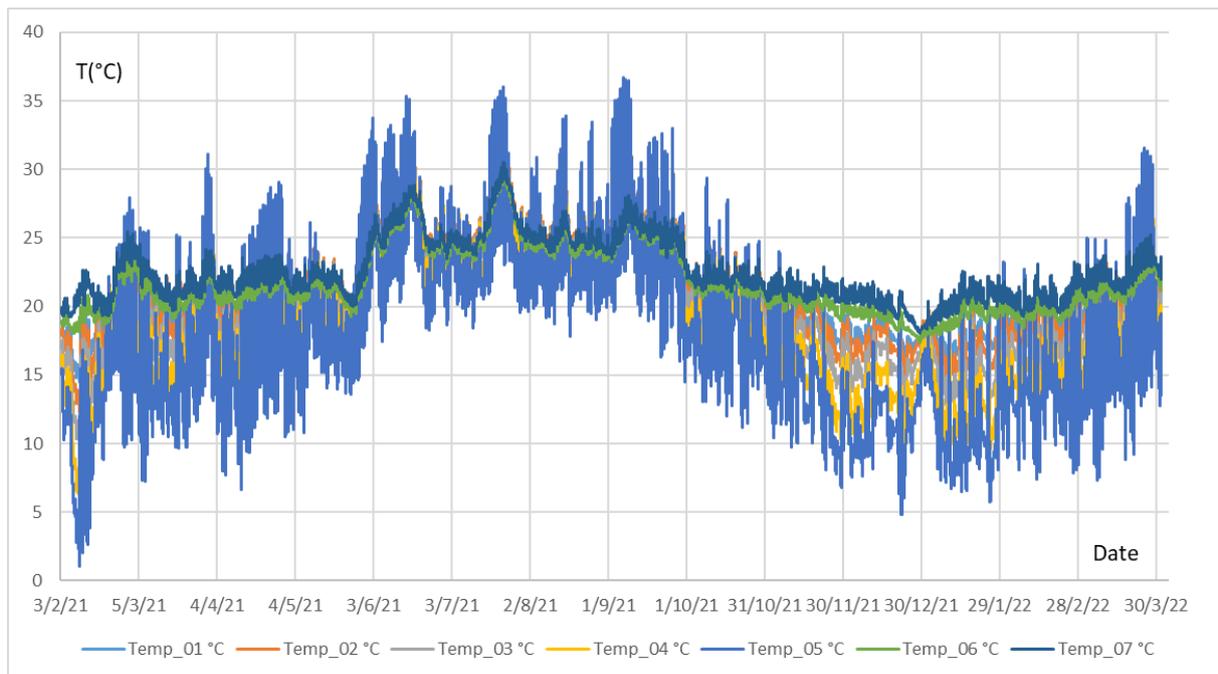


Figure 50: Evolution de la température T (°C) dans l'épaisseur de la paroi du 03/02/2021 au 31/03/2022. Source : Université d'Artois

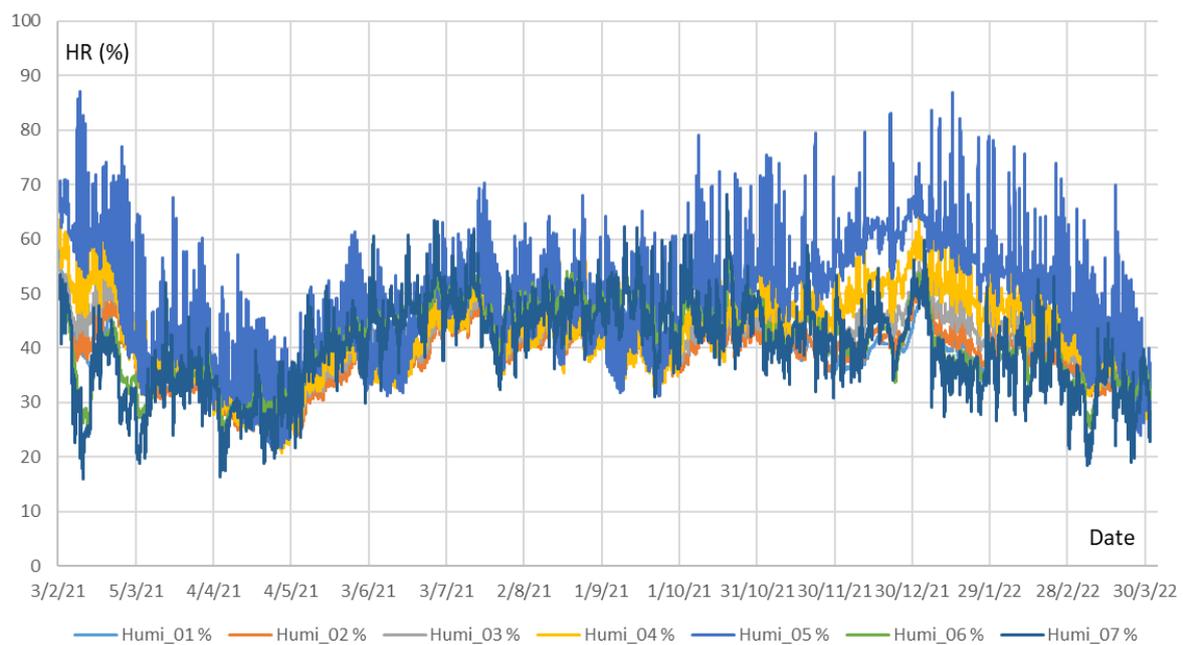


Figure 51: Evolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi du 03/02/2021 au 31/03/2022. Source : Université d'Artois

Les évolutions d'humidité relative au sein de la paroi sur une année montrent qu'il n'y a pas de risque de condensation ($HR < 90\%$), quel que soit l'endroit où on se place dans la paroi. Les amplitudes sont plus importantes pendant la période hivernale.

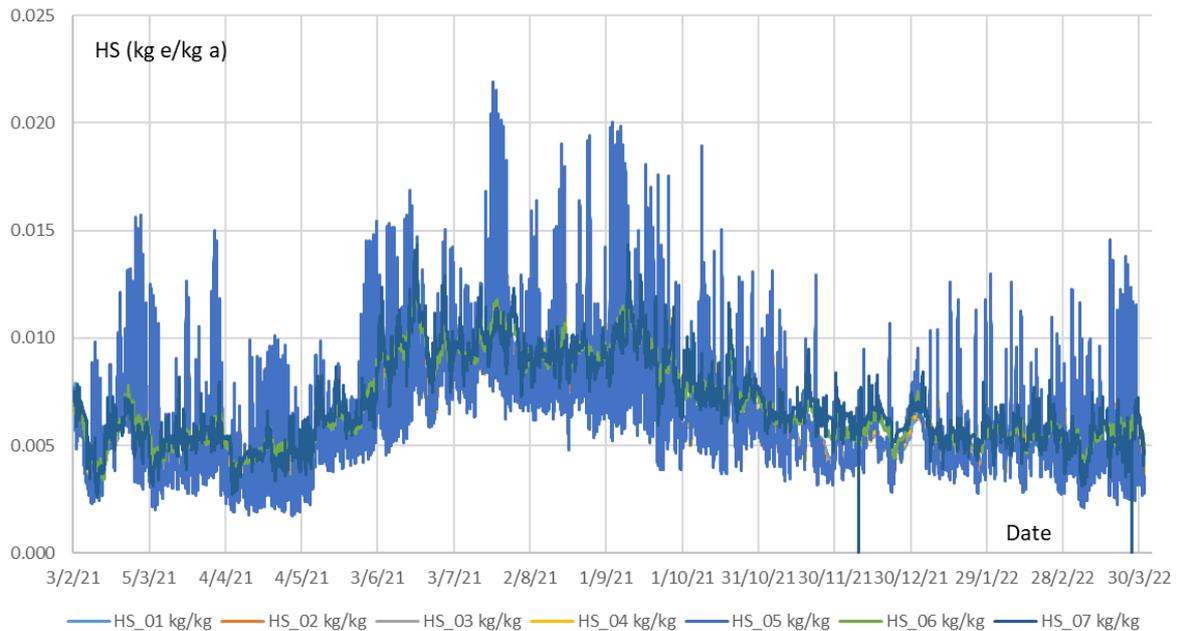


Figure 52: Evolution de l'humidité spécifique HS (kg vapeur d'eau / kg air) dans l'épaisseur de la paroi du 03/02/2021 au 31/03/2022. Source : Université d'Artois

Les calculs de valeurs d'humidité spécifique HS montrent une forte variabilité au cours de l'année à l'interface isolant/paroi extérieure, les valeurs varient entre 0.0025 kg eau /kg air sec et 0.022 kg eau /kg air sec. Cette variabilité s'atténue lorsque l'on progresse vers l'intérieur de la paroi.

6.2.2.2. Evolution des émissions de différents murs biosourcés

Variabilité spatiale des émissions d'un mur intégrant un isolant biosourcé

Comme à Moncheaux, les émissions spatiales de COV des trois parois biosourcées (SE, SO et NO) ont été caractérisées dans le groupe scolaire. Dans cette partie la variation spatiale des émissions de COV du mur orienté Sud-Est (SE) sera présentée. Les résultats obtenus pour les 2 autres murs sont présentés en [Annexe 6](#). Comme le montre la figure 53, ces émissions, évaluées en hiver, étaient faibles ($< 0,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) pour la plupart des espèces comparées à la période estivale. Il est important de noter que les taux d'émissions restent globalement du même ordre de grandeurs, même si les écarts peuvent être supérieurs à 30 % pour la plupart des composés, y compris COVT. Comme ce qui a été indiqué précédemment pour le site de Moncheaux, la non homogénéité d'une surface doit être prise en compte lors de l'interprétation des émissions de COV sur le terrain.

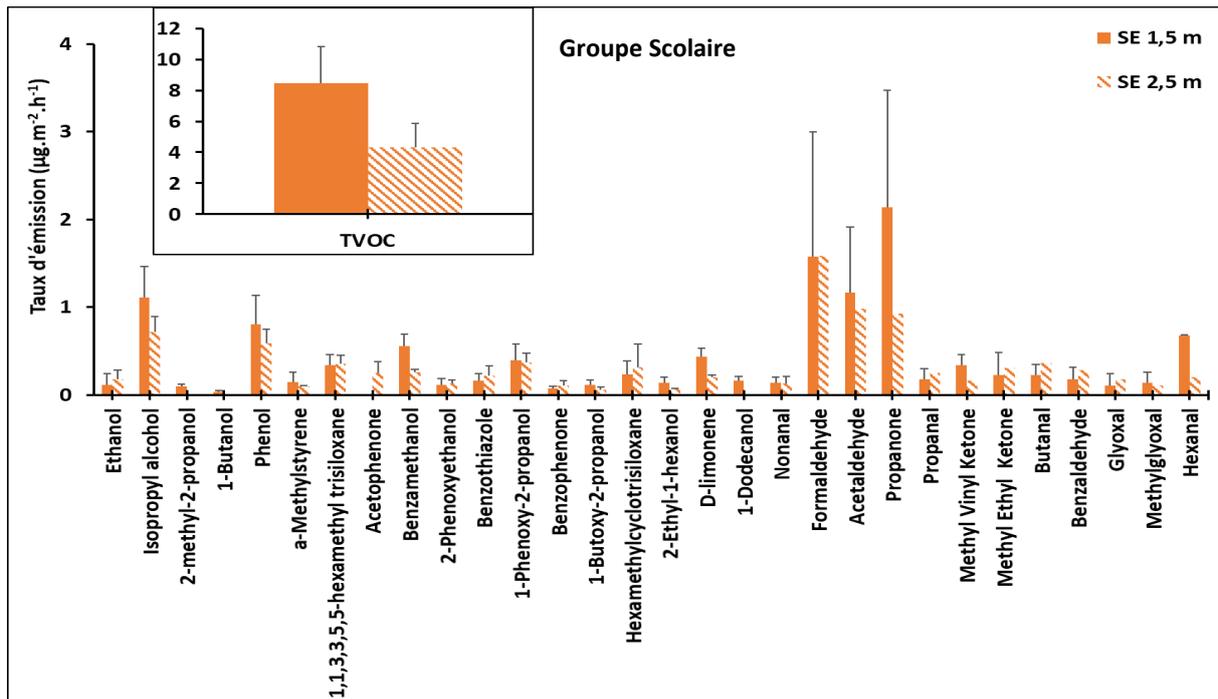


Figure 53: Variation spatiale hivernale des émissions de COV du mur orienté Sud-Est (SE) du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe

Variabilité temporelle courte des émissions d'un mur intégrant un isolant biosourcé

Les tableaux 22 et 23 montrent les émissions temporelles de COV dans le groupe scolaire pour les deux murs orientés Sud-Est (SE) et Sud-Ouest (SO) pendant l'hiver et l'été, respectivement. Comme le montrent ces tableaux, les émissions temporelles peuvent varier au cours de la journée en fonction du COV visé : certaines émissions restent globalement stables tandis que d'autres évoluent. En période hivernale, les émissions des deux murs testés sont globalement faibles et stables. Seuls le formaldéhyde et l'alcool isopropylique présentent des taux d'émissions supérieurs à $1 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène. Les COV ne se comportent pas tous de la même façon, comme illustré par l'exemple de formaldéhyde et alcool isopropylique. Ainsi l'émission de formaldéhyde du mur SE est variable avec un *maximum* ($4,7 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène) à 13h-16h alors qu'elle reste stable ($4-6 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène) pour le mur SO. En revanche, l'émission d'alcool isopropylique est stable ($1-2 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène) pour le mur SE alors qu'elle varie avec un *maximum* de 10h à 13h ($5 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène) pour le mur SO. Comme le mur SO n'est pas équipé par de capteurs hygrothermiques, il est difficile d'interpréter ces différences de comportement. Il semble donc plus intéressant de regarder les COVT que de regarder chaque COV individuellement.

En période estivale, les émissions sont plus importantes qu'en hiver, comme vu précédemment. Les composés majoritaires ($> 1 \mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ éq. toluène) émis depuis le mur SE et SO sont le 1-phénoxy-2-propanol, le benzothiazole et le 2-phénoxyéthanol. Les émissions de ces 3 composés des deux murs étaient presque stables tout au long de la journée, à l'exception du benzothiazole du mur SE qui a montré une émission plus élevée de 19h à 22h. Les émissions de COVT du mur SE étaient généralement les plus élevées de 16h à 19h pendant les deux saisons tandis que celles du mur SO à 10h-13h.

Afin d'interpréter les résultats obtenus, les évolutions hygrothermiques du mur SE au cours des 24 heures de prélèvement ont été extraites du paragraphe 6.2.2.1 pour la campagne hivernale et estivale. Comme le montrent les figures 54 et 55, la température et l'humidité relative ont été quasiment stables à l'intérieur de l'atelier (capteurs 6 et 7) ; cependant, la température et l'humidité relative atteignent un *maximum* entre 10h et 19h du côté externe du caisson contenant la ouate de cellulose (capteurs 4 et 5). Il est constaté que ce *maximum* est atteint plus tard dans la journée vers l'intérieur du caisson (capteurs 3-4) à cause du déphasage dû à l'isolant et est complètement lissé au niveau du capteur 1, qui se situe du côté intérieur du caisson. Ce *maximum* observé peut expliquer les concentrations plus élevées de COVT du mur SE pendant ces heures. Cependant, il est important de garder à l'esprit que pour les composés individuels, selon la source à l'origine de chacun d'entre eux, quelques heures peuvent être nécessaires pour qu'ils se diffusent de l'intérieur du mur à la surface (où est réalisé le prélèvement). Un décalage temporel peut donc être observé avant que les émissions atteignent leur *maximum*, ce qui pourrait expliquer par exemple le *maximum* observé pour le benzothiazole entre 19h et 22h

Tableau 22: La variation temporelle sur 24h des taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ eq. toluène) hivernales de COV des murs orientées Sud-Est (SE) et Sud-Ouest (SO) du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe

Composé	SE_Hiver									SO_Hiver								
	10h-13h	13h-16h	16h-19h	19h-22h	22h-01h	01h-04h	04h-07h	07h-10h	10h-13h (+1)	10h-13h	13h-16h	16h-19h	19h-22h	22h-01h	01h-04h	04h-07h	07h-10h	10h-13h (+1)
Formaldehyde	<LOD	4,7	1,7	1,0	0,4	1,6	<LQ	1,1	2,1	4,7	4,7	4,4	4,4	4,0	6,2	4,1	6,0	4,3
Isopropyl Alcohol	1,2	1,3	1,2	1,2	0,3	1,6	1,2	1,1	0,9	4,8	1,0	0,4	0,2	0,1	0,0	<LOD	<LOD	<LOD
1-Butanol + Benzene	0,3	0,2	0,2	1,6	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	<LOD	0,2
2,4-Dimethyl-3-pentanone	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	<LOD	0,2
Hexamethylcyclsiloxane	0,1	0,3	0,1	0,1	0,6	0,3	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,2	<LOD	<LOD
1-Butoxy-2-propanol	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<LOD	0,1
Octanal	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
Hexamethyl trisiloxane	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2
2-Ethyl-1-hexanol	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1
D-Limonene	0,7	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2
Acetophenone	0,2	0,2	0,3	0,2	<LOD	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	<LOD	0,1
Nonanal	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,3	0,2	0,2
2-Phenoxyethanol	0,2	0,1	0,2	0,3	<LOD	0,2	0,1	0,0	<LD	0,2	0,1	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Benzothiazole	0,1	0,1	0,2	0,2	<LOD	0,3	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	<LOD	0,4	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4
1-Phenoxypropanol	0,6	0,4	0,6	0,8	<LOD	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	<LOD	0,2
1-Dodecanol	0,2	0,2	0,2	0,2	<LOD	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	<LOD	0,2	0,1	<LOD	0,2
TVOC	9,0	8,0	12,1	8,5	5,2	10,9	7,0	5,4	10,2	10,0	8,0	8,2	6,6	5,9	8,6	7,3	<LOD	7,5

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

Tableau 23: La variation temporelle sur 24h des taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) estivales de COV des murs orientées Sud-Est (SE) et Sud-Ouest (SO) du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe

Composé	SE_Été								SO_Été							
	10h-13h	13h-16h	16h-19h	19h-22h	22h-01h	01h-04h	04h-07h	07h-10h	10h-13h	13h-16h	16h-19h	19h-22h	22h-01h	01h-04h	04h-07h	07h-10h
Benzene + 1-Butanol	1,1	1,5	1,9	2,0	4,0	3,3	1,6	1,5	0,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3
Phenol + Hexanoic Acid	5,9	5,4	7,5	7,0	6,8	4,6	6,5	5,8	3,2	3,2	3,5	3,6	3,2	3,1	2,9	2,9
Acetophenone	0,5	0,4	0,7	0,9	0,7	<LOD	0,5	0,4	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,0
Nonanal	0,1	<LOD	0,4	0,1	0,7	<LOD	0,1	0,6	0,5	<LOD	0,3	<LOD	<LOD	0,03	<LOD	<LOD
2-Phenoxyethanol	1,2	0,8	1,6	1,7	0,8	0,6	1,5	1,1	1,5	1,3	0,9	1,3	1,2	1,1	0,8	0,9
Benzothiazole	1,4	1,0	1,5	3,7	1,5	1,2	1,8	1,8	1,3	0,7	0,8	1,5	0,8	0,8	0,7	0,8
1-Phenoxy-2-propanol	4,2	3,4	4,9	4,7	3,7	3,3	3,6	3,5	4,1	3,9	4,0	4,4	3,8	3,7	3,1	3,2
Acetic acid	0,5	<LOD	1,3	2,8	0,6	1,2	0,8	0,4	0,1	0,3	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3
Benzoic acid	4,7	5,5	5,6	6,6	5,3	<LOD	4,5	2,7	2,5	2,6	2,9	2,7	3,5	3,8	2,3	2,7
Heptanoic acid	1,0	0,9	1,3	1,2	1,2	0,7	0,9	0,9	NQ	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7
Octanoic acid	3,1	2,5	3,3	3,3	2,9	<LOD	2,8	2,3	3,0	2,7	2,7	2,9	2,7	2,7	2,3	2,3
Nonanoic acid	3,7	3,3	4,6	4,4	3,7	2,5	3,1	2,8	3,8	3,6	3,6	3,8	3,6	3,4	3,1	2,9
Decanoic acid	0,8	0,5	1,1	0,9	0,7	0,1	0,4	0,4	0,7	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4	0,5
Diethyl phtalate	0,8	0,7	1,2	1,0	0,7	0,0	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,8
Diisobutyl phtalate	6,5	8,6	14,5	11,4	10,9	<LOD	8,8	9,2	8,9	7,0	8,4	6,3	5,7	9,1	11,4	11,2
Dibutyl phtalate	1,4	1,6	2,1	3,8	2,1	<LOD	1,6	1,7	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4	1,5	1,2	1,4
TVOC*	37,3	20,0	43,4	41,6	29,5	9,1	41,0	26,3	24,9	25,8	20,3	21,0	22,4	16,4	11,2	15,3

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

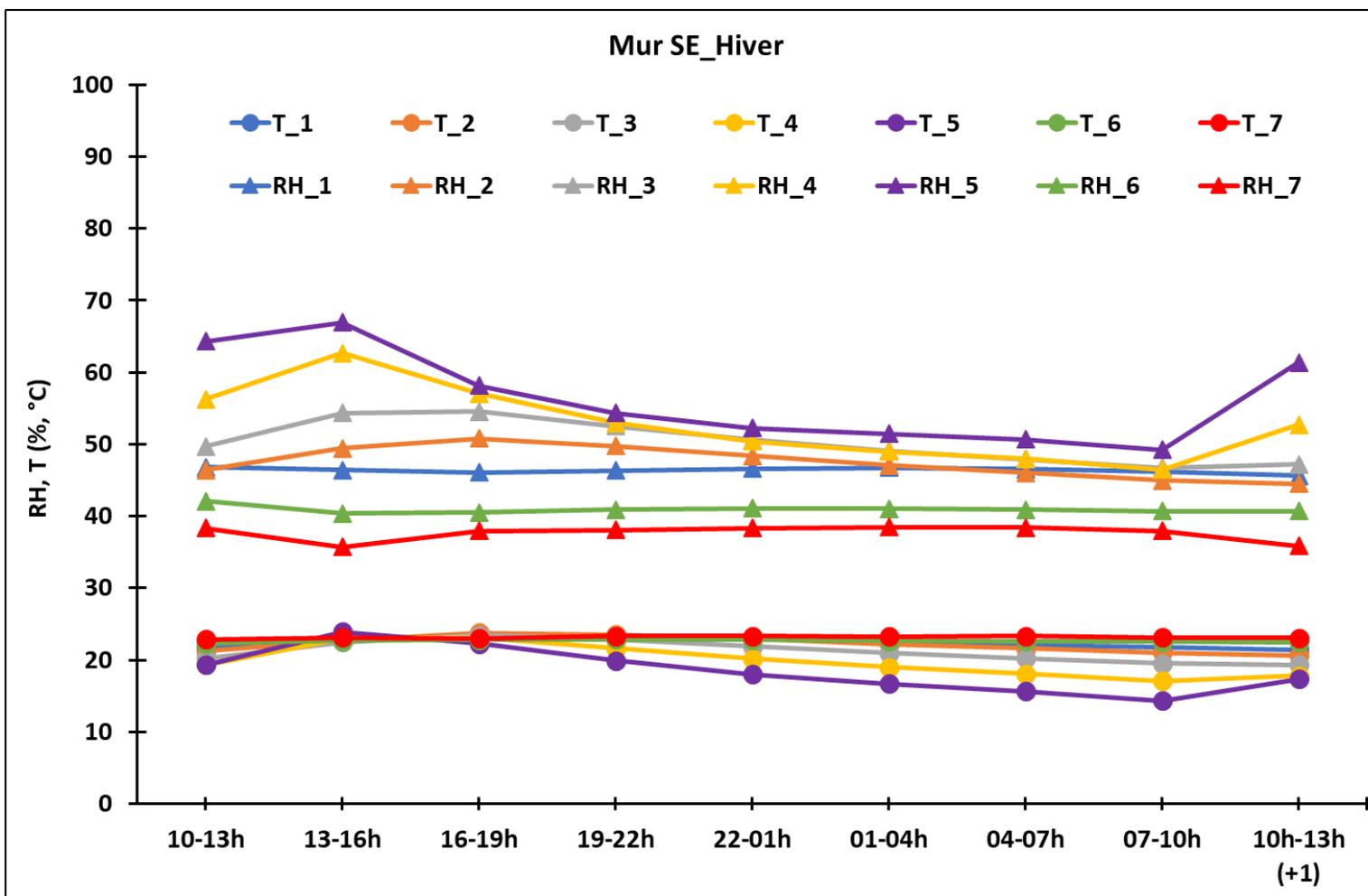


Figure 54: L'évolution de l'humidité relative (en haut) et la température (en bas) dans le mur orienté Sud-Est (SE) du groupe scolaire pendant les 24 heures de prélèvement de COV en hiver (25-26/02/2021) (cf. § 6.2.2.1). Source : IMT Nord-Europe

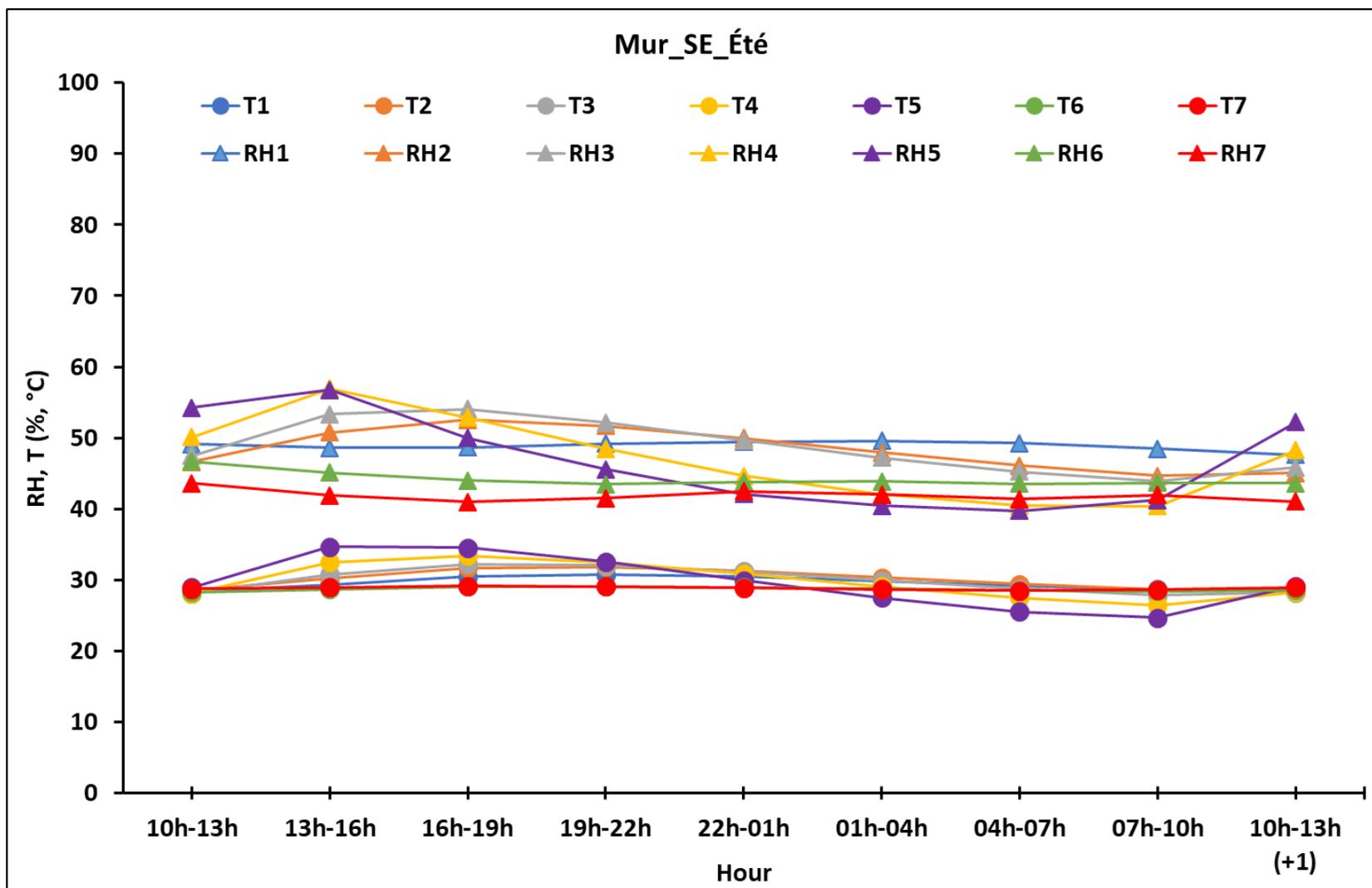


Figure 55: L'évolution de l'humidité relative (en haut) et la température (en bas) dans le mur orienté Sud-Est (SE) du groupe scolaire pendant les 24 heures de prélèvement de COV en été (20-21/07/2021) (cf. § 6.2.2.1). Source: IMT Nord-Europe

Résultats des émissions sur les différents murs intégrant des éléments biosourcés au cours des deux saisons explorées

La figure 56 présente les taux d'émissions supérieures à $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène des COV émis par des trois parois intégrant l'isolant biosourcé. De manière très différente par rapport à ce qui avait été constaté sur le site de Moncheaux, les COV identifiés majoritairement lors de la campagne estivale et hivernale sont de nature très différente. Ainsi il est possible de constater que de très nombreux acides ont été mesurés exclusivement en période estivale, à des niveaux relativement élevés, compris entre 1 et $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène. De ce fait, les acides forment le groupe d'espèces majoritairement émises en été par les trois parois intégrant l'isolant biosourcé alors qu'ils ne sont pas détectés en période hivernale. Concernant les autres espèces, de manière assez comparable à ce qui a été mesuré sur le site de Moncheaux, les taux d'émissions mesurés en été sont généralement supérieurs aux taux d'émissions mesurés en hiver ; c'est ainsi le cas pour le 1-butanol, l'acétophénone, le 2-phenoxyethanol, le benzothiazole, le 1-phénoxy-2-propanol. Cette observation est également à mettre en regard des conditions hygrothermiques mesurées dans l'atelier où la température et l'humidité relative ont été respectivement de 23°C et 32 % en hiver, et de 27°C et 46 % en période estivale.

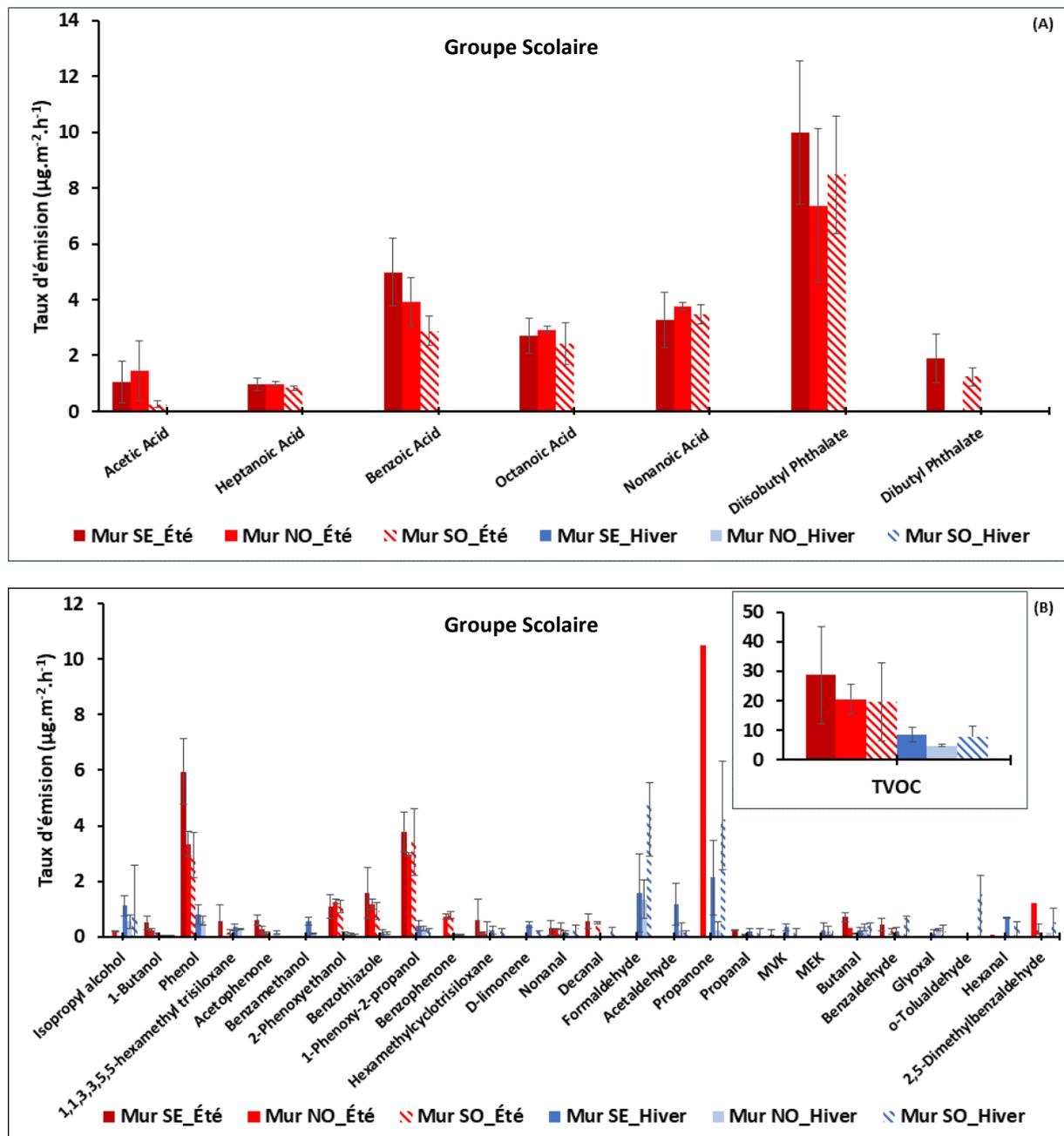


Figure 56: Emissions (A) en acides, (B) en COV majoritairement quantifiés des différentes surfaces intégrant un isolant biosourcé sur le site du groupe scolaire en périodes estivale (rouge) et hivernale (bleu) (à noter que l'échelle sur l'axe des Y n'est pas la même pour A et B). Source : IMT Nord-Europe

Il est également possible de constater que les mesures des taux d'émissions des différentes espèces émises ne sont pas significativement différentes selon l'orientation des murs contrairement à ce qui avait été observé sur le site de Moncheaux.

Comparaison entre les émissions sur site et de matériaux seuls pour le site du groupe scolaire

Une comparaison des émissions de COV à 50 % d'HR des matériaux individuels qui constituent les murs biosourcés du groupe scolaire (paragraphe 4) aux émissions hivernales et estivales sur site des 3 murs (paragraphe 6) a été faite. La figure 57 rassemble les composés majoritairement ($> 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) émis par les matériaux individuels et leurs taux d'émissions sur le site du groupe scolaire. Comme le montre cette figure, très peu de composés en commun ont été détectés entre les matériaux seuls et les surfaces sur site. On peut voir le formaldéhyde et la propanone, qui sont émis par le panneau OSB et l'ossature bois, l'acide benzoïque, qui est émis par l'ouate de cellulose, ainsi que l'acide nonanoïque et l'acide heptanoïque qui sont émis par l'ossature bois. Cependant, les taux d'émissions du formaldéhyde et de la propanone sont nettement plus élevés pour les matériaux individuels par rapport aux émissions sur site. Cela peut être associé à l'âge du bâtiment ; en effet, un vieillissement naturel des matériaux peut entraîner une diminution des taux d'émissions, comme mentionné également dans les paragraphes 4 et 5.

D'autre part, la figure 58 rassemble les principaux COV ($> 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) émis sur site du groupe scolaire en période estivale (principalement des acides et des phtalates) et leur comparaison avec les émissions de matériaux individuels. Comme le montre la figure 58, les taux d'émissions d'acides, à l'exception de l'acide acétique et l'acide heptanoïque, sont plus élevés sur site en période estivale que par les émissions des matériaux individuels. Ceci peut être expliqué par le nettoyage du sol qui a eu lieu en été une semaine avant le début de la campagne et qui a probablement contaminé toutes les autres surfaces de la pièce. Ceci semble confirmer notre hypothèse que la source de ces composés est non associée au bâti biosourcé, mais est en lien avec des phénomènes de contamination au nettoyage du sol.

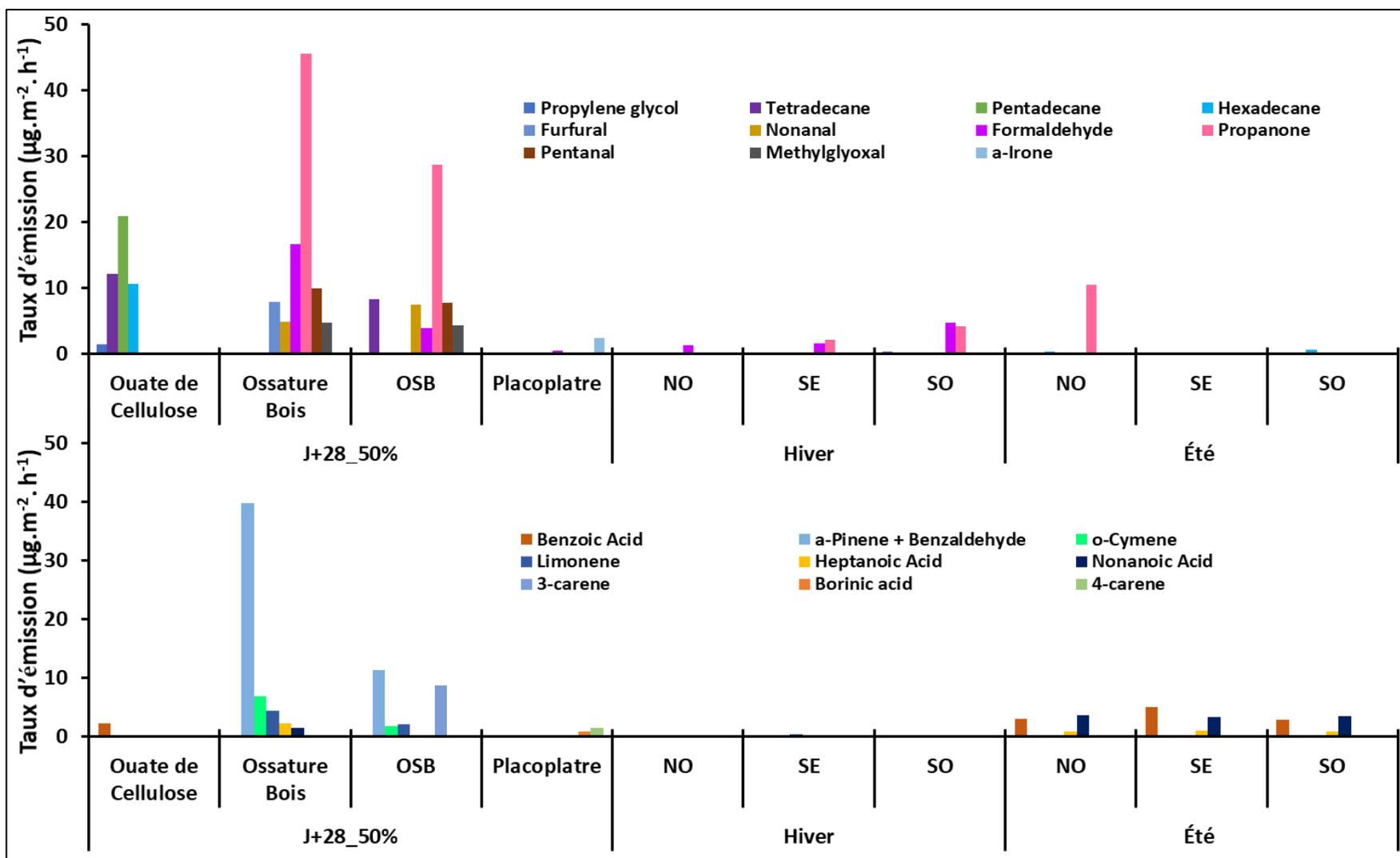


Figure 57: Comparaison des émissions de COV majoritaires (> 1 µg.m-2.h-1 éq. toluène) émis par les matériaux individuels constituant les murs biosourcés avec leur taux d'émissions sur site du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe

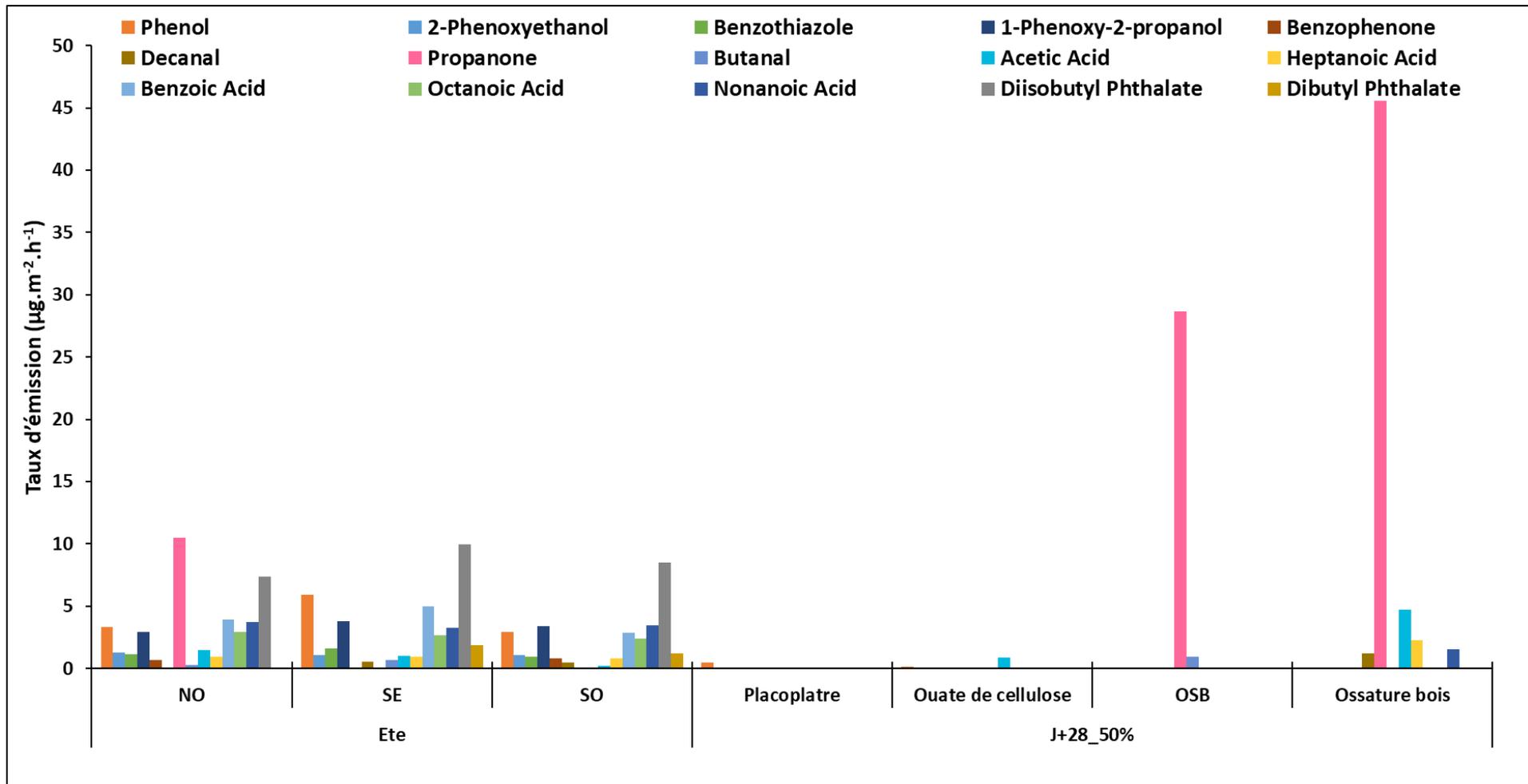


Figure 58: Comparaison des émissions de COV majoritaires (> 1 µg.m-2.h-1 éq. toluène) mesurés sur site du groupe scolaire en période estivale aux émissions des matériaux individuels constituant les murs biosourcés. Source : IMT Nord-Europe

6.2.2.3. Évolution des émissions de l'ensemble des surfaces

L'ensemble des résultats associés aux mesures d'émissions qui ont été conduites sur les différentes surfaces identifiées dans le site du groupe scolaire est rassemblé dans le tableau 24. Ce tableau rassemble l'ensemble des espèces pour lesquelles au moins une surface présente un taux d'émissions supérieur à $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène.

Les mesures réalisées permettent de mettre clairement en évidence que les composés émis sont de nature très différente entre l'été et l'hiver. En particulier, en période estivale, la totalité des surfaces est caractérisées par des émissions importantes en acides alors que ces espèces ont été quantifiées comme $< 0,004 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène en hiver pour toutes les surfaces. Il est important de noter que, pour ces espèces, la surface la plus émissive est le sol. L'hypothèse la plus probable est qu'une opération de nettoyage intensif était menée sur cette surface antérieurement à la réalisation de la campagne et qu'une contamination associée au sol ait pu avoir lieu sur la totalité des autres surfaces de la pièce. Cette hypothèse a été confirmée par les responsables de l'école où un nettoyage intensif de l'atelier a eu lieu une semaine avant le début de la campagne.

Concernant les résultats de la campagne hivernale, les trois murs intégrant l'isolant biosourcé ne présentent pas d'émissions de COV spécifique puisque les mêmes espèces peuvent être identifiées et quantifiées comme émises par d'autres surfaces même si les taux d'émissions sont différents.

Tableau 24: Taux d'émissions de COV ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) émis des 8 surfaces évaluées en été et en hiver sur le site du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe

	Été						Hiver					
	Paroi	SE	SO	NO	Sol	Plafond	Paroi	SE	SO	NO	Sol	Plafond
Formaldehyde	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.2	4.3	2.6	1.6	4.7	1.4	1.7	3.7
Acetaldehyde	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	4.6	<LOD	0.2	1.2	0.2	0.2	2.1	2.0
Propanone	<LOD	<LOD	<LOD	10.5	<LOD	<LOD	<LOD	2.1	4.2	0.2	<LOD	0.4
Propanal	<LOD	0.2	0.1	<LOD	3.7	0.4	0.2	0.2	0.2	<LOD	1.0	0.7
Butanal	0.4	0.7	0.1	0.3	1.0	1.1	0.2	0.2	0.4	0.3	0.3	0.6
o-Tolualdehyde	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1.5	<LOD	<LOD	<LOD
Hexanal	<LOD	0.1	<LOD	<LOD	2.4	0.3	0.3	0.7	0.4	<LOD	0.6	0.9
2,5-Dimethylbenzaldehyde	<LOD	<LOD	0.3	1.2	<LOD	0.2	0.5	<LOD	0.5	0.2	0.2	0.6
Isopropyl alcohol	<LOD	<LOD	<LOD	0.2	<LOD	<LOD	0.1	1.1	0.7	0.5	0.6	1.9
2-Methyl-2-propanol	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.1	0.1	<LOD	0.5	0.6	1.9
Phenol	3.4	5.9	2.9	3.3	4.4	3.2	0.4	0.8	<LOD	0.6	0.6	0.7
2-Phenoxyethanol	1.2	1.1	1.1	1.3	<LOD	1.6	<LOD	0.1	0.03	0.1	0.1	0.2
Benzothiazole	1.5	1.6	1.0	1.2	1.5	1.4	0.3	0.2	<LOD	0.1	0.2	0.4
1-Phenoxy-2-propanol	3.7	3.8	3.4	3.0	45.3	4.0	0.2	0.4	0.3	0.3	0.5	0.9
1-Butoxy-2-propanol	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1.4	<LOD	0.1	<LOD	<LOD	<LOD	0.2
D-Limonene	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.4	0.4	0.2	<LOD	<LOD	2.1
1-Dodecanol	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1.6	<LOD	<LOD	0.2	0.1	<LOD	0.2	<LOD
2,4-Dimethyl-3-pentanone	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.1	<LOD	<LOD	2.9
Nonanal	0.6	0.3	0.3	0.3	<LOD	2.5	0.2	0.1	0.3	<LOD	<LOD	0.3
Tetradecane	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.4	1.2	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.1	0.2
Diethyl phthalate	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	1.1	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.2	<LOD
Acetic Acid	0.5	1.0	0.2	1.5	0.8	0.7	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Benzoic Acid	3.2	5.0	2.9	4.0	4.6	1.2	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Heptanoic Acid	1.0	1.0	0.8	1.0	18.1	0.8	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Octanoic Acid	2.9	2.7	2.4	2.9	36.8	3.2	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Nonanoic Acid	3.8	3.3	3.5	3.8	38.9	5.0	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Diisobutyl phthalate	4.9	10.0	8.5	7.4	13.8	6.6	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Diobutyl phthalate	3.2	1.9	1.2	<LOD	2.4	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
TVOC*	20.7	28.7	19.6	20.5	215	47.8	5.5	8.5	7.8	4.8	6.6	20.6

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

6.2.3. Caractérisation des concentrations ambiantes du site n°2

6.2.3.1. Mesures en continu sur 2 semaines

La campagne d'hiver du groupe scolaire s'est déroulée du 22 février au 5 mars 2021 selon la méthodologie précisée en [Annexe 5](#).

La campagne d'été s'est déroulée du 12 au 26 juillet 2021. Initialement prévue à l'été 2020, elle a dû être reportée en raison de la crise sanitaire.

Les résultats des tubes passifs sont résumés dans le tableau suivant, dont les données ont été traitées de la même manière que les données de Moncheaux.

Tableau 25: Résultats des tubes passifs sur les 2 campagnes été et hiver réalisées sur le site n°2. Source : Cerema

Composés En µg/m³	Campagne d'hiver				Campagne d'été			
	Semaine 1		Semaine 2		Semaine 1		Semaine 2	
Position du tube	Centre	Coin	Centre	Coin	Centre	Plafo<LOD	Centre	Plafo<LOD
Formaldéhyde	17,2	19,7	13,6	15,2	49,4	44,7	25,8	25,8
Acétaldéhyde	16,8	16,4	16,5	17,9	21,9	26,4	11,9	11,7
Propanal	3,4	3,6	3,5	3,8	8,0	7,5	4,4	4,5
Butanal	11,1	12,0	8,2	9,3	25,4	25,9	15,1	16,0
Benzaldéhyde	1,3	1,3	1,1	1,1	2,3	2,2	1,8	1,9
Valéraldéhyde	3,4	3,5	2,6	2,8	9,1	8,6	4,2	3,8
Hexanal	10,7	11,2	7,3	7,5	26,1	23,9	12,9	11,8

Les résultats du GC Companion se sont avérés non concluants : les composés sont restés en dessous du seuil de quantification tant en été qu'en hiver. Dans la mesure où les balises ont détecté des composés organiques, cela peut indiquer que les composés présents ne sont pas ceux auquel le GC est le plus sensible. Une calibration ultérieure a également montré que le GC avait perdu en sensibilité entre les campagnes – plus de 700 chromatogrammes ont été pris au cours du projet, et la colonne utilisée s'est dégradée au cours du temps.

Les résultats des balises sont plus délicats d'interprétation. Ci-dessous le suivi des paramètres de la balise NEMO pendant la campagne d'hiver : groupe scolaire

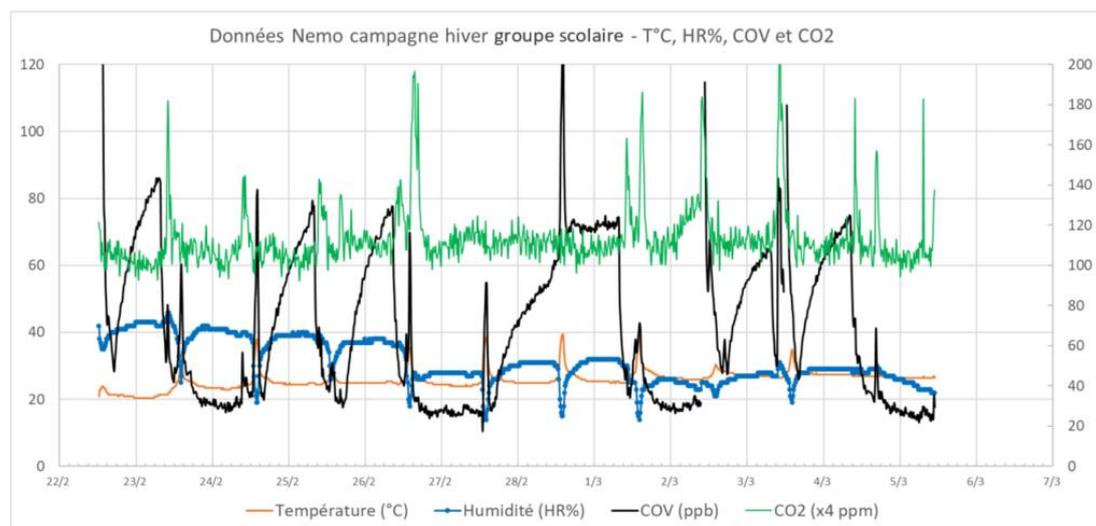


Figure 59: évolution des paramètres relevés par la balise NEMO au cours de la campagne d'hiver sur le groupe scolaire. Source : Cerema

On constate une montée générale des COV la nuit (comme ce qui avait été remarqué à Moncheaux) qui peut être associée à une diminution du taux de renouvellement d'air induisant des concentrations ambiantes associées aux émissions du bâti sauf certaines nuits (23/24 février, 26/27, 1/2 mars, 4/5 mars), sans qu'il nous ait été possible de déterminer les raisons de ces anomalies. Un dysfonctionnement des systèmes de ventilation est envisagé (si la ventilation est restée sur le réglage de jour ces nuits-là, cela pourrait expliquer les mesures).

On peut plus facilement comparer les résultats de la balise Fireflies (cohérents avec ce qui a été relevé par la balise NEMO) :

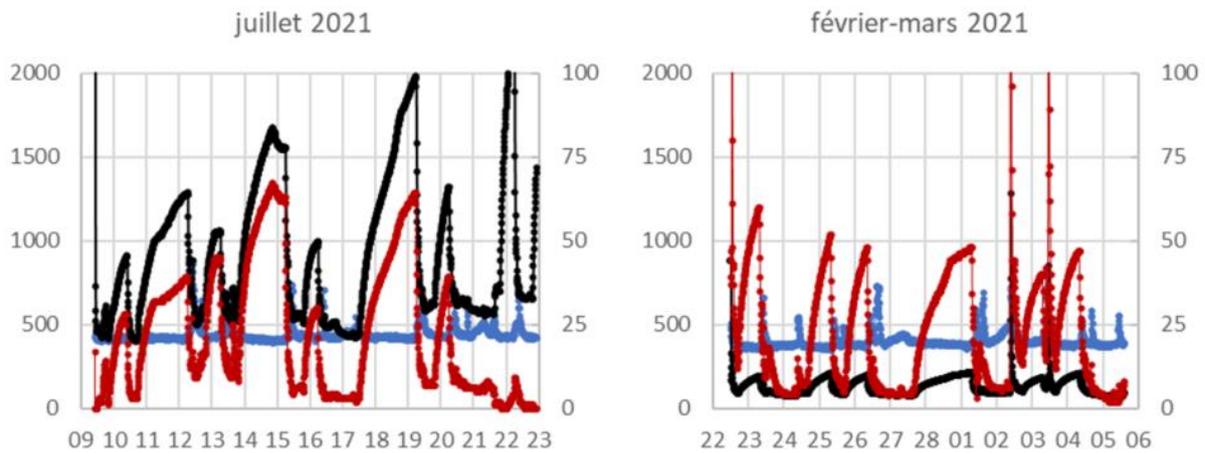


Figure 60: Relevés de la balise fireflies sur le site du groupe scolaire, en été et en hiver. Source : Cerema

Comme déjà constaté à Moncheaux, on observe une périodicité quotidienne des concentrations en COV, à l'exception des week-ends et jours fériés (réduit continu de ventilation ?) où la montée en concentration perdure pendant la journée. Cette périodicité souffre toutefois (comme la balise NEMO l'avait déjà remarqué) d'exception certaines nuits (défaut technique du réduit de ventilation ?). Les concentrations relevées sont également beaucoup plus basses en hiver pour les COV totaux (on passe de *maxima* relevés aux alentours de 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en équivalent toluène l'été à moins de 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ l'hiver), une tendance qu'étrangement les COV légers ne suivent pas. Une interprétation possible en serait que les COV légers sont plus sensibles à des phénomènes d'adsorption / désorption relativement rapides (sur la journée plutôt que sur la saison), or même en hiver l'atelier où ont été prises les mesures est assez chaud (exposition au soleil), ce qui accélère cette désorption. Une autre possibilité serait que l'anomalie ne se trouve pas en hiver, mais en été, où les taux de COV totaux seraient anormalement hauts. Cette hypothèse, confirmée par la suite des résultats, résulte *a priori* d'un grand ménage réalisé dans les locaux les jours précédant la campagne.

6.2.3.2. Évolution spéciée des COV sur 24h

De manière similaire à ce qui a été fait pour le site de Moncheaux, l'ensemble des résultats du suivi sur 24h des concentrations de COV ambiantes sont présentés respectivement dans les tableaux en [Annexe 6](#), pour les COV supérieurs à 1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ observés pendant la campagne estivale (du 12 au 13 juillet 2021) et hivernale (du 4 au 5 mars 2021) dans le groupe scolaire. 21 composés avec une concentration supérieure à 1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ont été quantifiés dans l'air intérieur en hiver, comparés à 45 composés quantifiés en été, la majorité de ces composés étant des aldéhydes. Cependant, en raison de la contamination potentielle du sol, mentionnée précédemment, un groupe d'acides avec une concentration dans l'air intérieur allant jusqu'à 7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a également été quantifié en été. Ces composés n'avaient pas été détectés auparavant en hiver.

Dans un premier temps, les évolutions des quelques COV sélectionnés pour être représentatifs pour chaque surface de la pièce, sont présentés. Ainsi sur la figure 61 ont été rassemblées le formaldéhyde représentatif des émissions de toutes les surfaces et l'acétaldéhyde pour le plafond et le sol en hiver. En revanche, sur la figure 62 le benzothiazole était associé en été aux émissions de la paroi et des trois murs biosourcés tandis que le 1-phénoxy-2-propanol est principalement émis par le sol et le 1-butoxy-2-propanol du plafond.

Contrairement à Moncheaux où de manière cohérente, une augmentation des concentrations ambiantes était observée en période nocturne, il est possible de constater qu'ici les évolutions des concentrations sont différentes en période estivale et hivernale. En été, il est constaté une augmentation des concentrations en période nocturne ; cette augmentation peut être associée à une diminution du taux de renouvellement d'air. Cette même évolution a été constatée au travers du suivi de

concentrations globales en COV via l'utilisation de la balise NEMo (cf ci-dessus). A l'opposé, en période hivernale, une diminution des concentrations est observée la nuit sans qu'une explication puisse être avancée. Cette observation est en cohérence avec ce qui a été obtenu avec la balise NEMo qui a mis en évidence un comportement « atypique » des concentrations ambiantes au cours de 4 nuits sur la période de suivi.

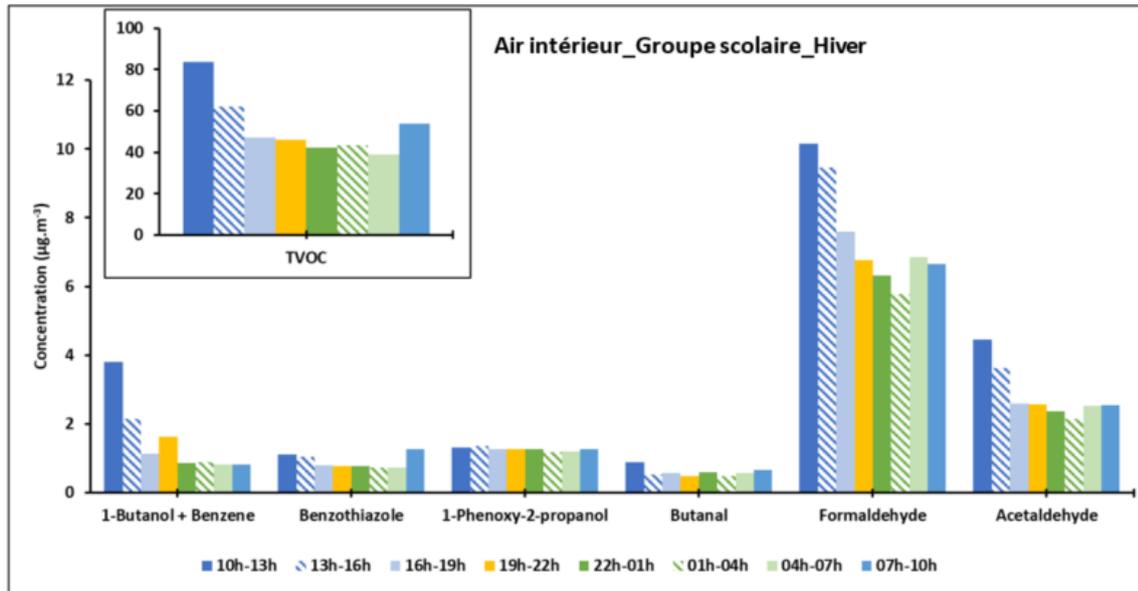


Figure 61: Évolutions temporelles des concentrations en quelques COV (durées de prélèvement intégrées de 3 heures) les 4 et 5 mars 2021 sur le site du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe

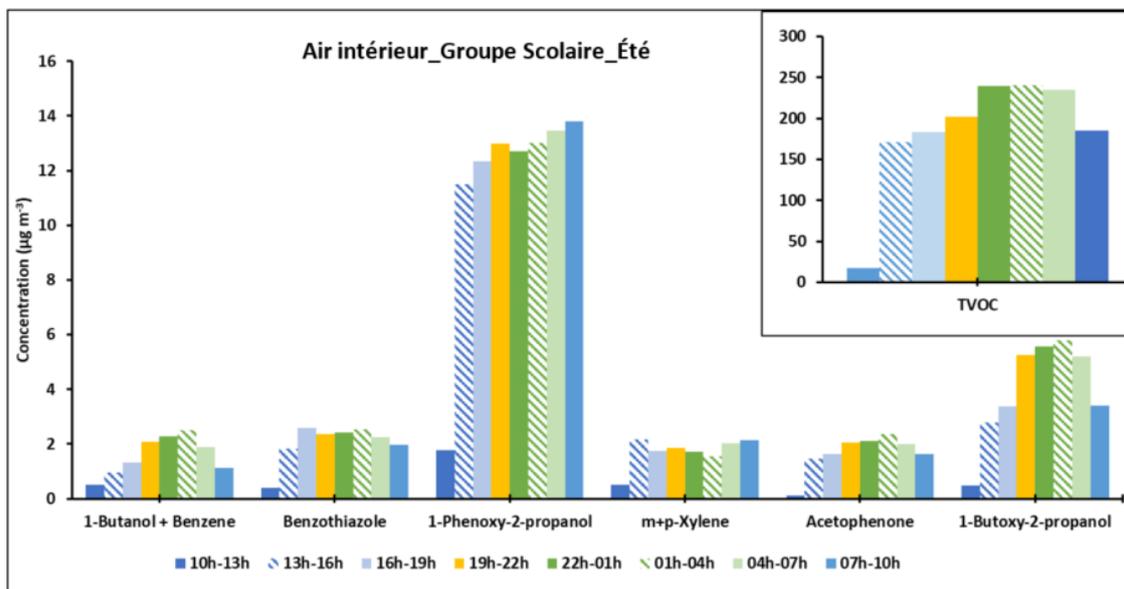


Figure 62: Évolutions temporelles des concentrations en quelques COV (durées de prélèvement intégrées de 3 heures) les 12 et 13 juillet 2021 sur le site du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe

6.2.3.3. Mise en regard des concentrations mesurées en air intérieur et émissions surfaciques mesurées pour quelques COV

Afin de mettre en regard les COV majoritairement émis par les différentes surfaces et quelques COV majoritaires quantifiés en air intérieur, les figures 63 et 64 rassemblent les concentrations moyennes de 6 espèces mesurées respectivement en période hivernale et estivale et les émissions cumulées des différentes surfaces en prenant en compte les taux d'émissions moyens mesurés pour chacune des surfaces, de manière similaire à ce qui a été fait pour le site à Moncheaux. Encore une fois, il est important d'être vigilant quant à la comparaison directe des taux d'émissions des différentes surfaces : en effet, les taux sont exprimés par unité surfacique ($/m^2$) alors que les différentes surfaces sont de tailles très différentes et que pour aller plus loin dans l'interprétation, il conviendrait de pondérer les taux d'émissions surfaciques par les aires respectives des différentes surfaces. On peut voir que, malgré les concentrations en COV ambiant plus élevées en été, les émissions des surfaces ; notamment du sol, semblent contribuer largement aux concentrations ambiantes, contrairement à ce qui était observé sur le site de Moncheaux et en hiver au groupe scolaire.

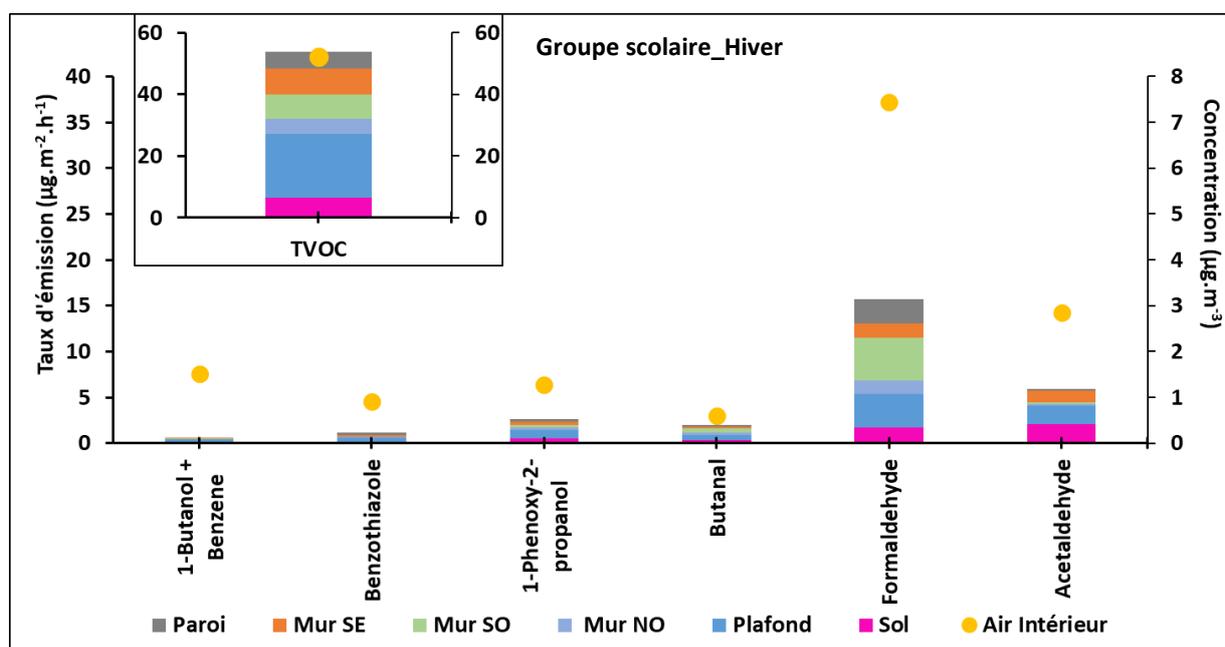


Figure 63: Mise en regard des émissions des différentes surfaces (axe des ordonnées gauche) et des concentrations mesurées en air intérieur (axe des ordonnées droite) sur le site du groupe scolaire lors de la campagne hivernale. Source : IMT Nord-Europe

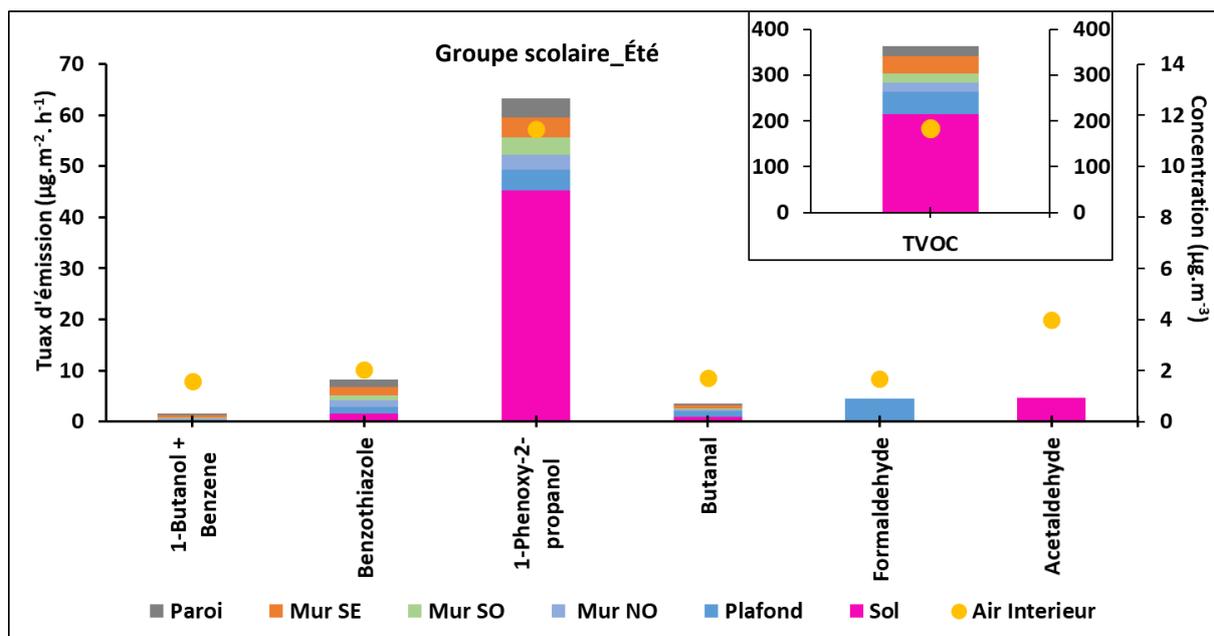


Figure 64: Mise en regard des émissions des différentes surfaces (axe des ordonnées gauche) et des concentrations mesurées en air intérieur (axe des ordonnées droit) sur le site du groupe scolaire lors de la campagne estivale. Source : IMT Nord-Europe

6.2.3.4. Caractérisation des micro-organismes en lien avec les conditions environnementales

Le tableau 26 présente les résultats des prélèvements et mises en culture effectuées lors des 2 campagnes de mesure en mars et en juillet 2021. De manière générale il apparaît qu'il y a moins de micro-organismes présents en suspension dans l'air en mars qu'en juillet avec néanmoins un niveau global relativement faible. Cette observation est normale car en été il y a plus de micro-organismes dans l'air qu'en période hivernale [23]. De plus, le niveau relativement faible est lié à un bon taux de renouvellement de l'air assuré par le système de ventilation. Le zonage effectué en juillet montre une disparité entre les différents points de prélèvement avec des concentrations plus importantes au niveau de la zone 1 et plus faible vers la zone 3. Cette différence peut, peut-être, s'expliquer par des variations dans les mouvements de l'air liées à la ventilation (proximité de la zone d'extraction etc.).

Tableau 26: Résultats des campagnes de mesure (<LOD : non déterminer, zone 1 = prélèvement avec Mass 100 posé sur une table, zone 2 = prélèvement à côté de la fenêtre, zone 3 = prélèvement à proximité du point d'eau ; <LOD = non déterminé, AM = matin ; PM = après-midi). Source : IMT Atlantique

Milieu de culture	(02/03/2021) UFC/m ³	(03/03/2021) UFC/m ³	(12/07/2021) UFC/m ³			(13/07/2021) UFC/m ³		
			Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Gélose ordinaire	77	103	456	130	68	580	122	22
Gélose R2A	60	212	386	306	<LOD	398	104	58
Gélose Chapman	19	19	144	68	42	98	16	16
Gélose MEA	21	73	158	58	<LOD	48	<LOD	<LOD
Gélose Czapek Dox	48	87	316	108	<LOD	260	54	16
Gélose DRBC	0	3	22	10	8	4	0	0
Gélose DG 18	6	23	136	74	40	60	10	14

7. Synthèse des données produites & modèle simplifié

7.1. Synthèse thématique des données produites *in situ* et en laboratoire

7.1.1. Prélèvements microbiens

Les prélèvements microbiens réalisés dans l'air ambiant sur site réel (2 campagnes par site, l'une en été, l'autre en hiver) ne mettent pas en évidence de développement microbien pouvant provenir d'une source intérieure. En revanche, une variabilité saisonnière a bien été mise en évidence, avec une augmentation des colonies dénombrées après mise en culture lors des campagnes estivales, comparativement aux campagnes hivernales, sur chacun des deux sites. La source est donc extérieure.

Concernant le mur constitué de laine de bois, si l'humidité relative est correctement régulée, le développement microbien reste limité. En revanche, en conditions humides (conditions dites dégradées), une croissance microbienne est constatée au sein du matériau mais également au sein de la paroi reconstituée, malgré la présence d'anti-fongique dans la laine testée.

Enfin, concernant le mur en ouate de cellulose, aucun développement microbien n'a pu être constaté dans le matériau, quel que soit le couple température / humidité choisi. La constitution de la ouate de cellulose (plus de 10 % en masse de sulfate de magnésium et 4 à 5 % d'acide borique) ne permet pas de développement fongique ou bactérien.

En résumé :

- Air ambiant : pas d'alerte à relever, des variations sont observées mais elles sont liées aux variations climatiques et saisonnières ([voir les paragraphes 6.1.3.4 et 6.2.3.4](#)).
 - Mur en laine de bois : si la gestion de l'humidité relative dans le matériau et la paroi est bonne, le développement microbien reste faible voire nul. En revanche, en conditions dégradées, la croissance microbienne aura lieu malgré les produits anti-fongiques contenus dans la laine de bois ([voir les paragraphes 5.2.2.4 et 6.1.3.4](#)).
 - Mur en ouate de cellulose : pas de développement microbien constaté sur le matériau, quelles que soient les conditions hygrothermiques auxquelles le matériau a été soumis ([voir les paragraphes 5.2.3.2 et 6.2.3.4](#)).
- ⇒ Pas d'alerte relevée *a priori* liée au développement microbien que ce soit sur site, dans les parois reconstituées et au niveau matériau.

7.1.2. Transferts hygrothermiques

Dans les parois suivies durant 12 mois sur site réel (paroi isolée en laine de bois par l'intérieur et orientée Sud-Est sur le site de la mairie de Moncheaux / paroi isolée en caisson avec de la ouate de cellulose insufflée et orientée Sud-Est également sur le site du groupe scolaire), aucun risque de condensation n'a été constaté, ce qui traduit une bonne gestion de l'humidité de ces parois, en cohérence avec les précautions prises par la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre pour que les règles de l'art concernant la construction bois notamment soient respectées.

En résumé :

- La gestion du risque humidité est essentielle dans les parois pour éviter les dégradations (dégâts structurels, fonctionnels et/ou esthétiques) et le développement microbien ([voir le paragraphe 5.2.2.4](#)).
- Pas de risque de condensation dans les parois constatées sur chacun des 2 sites, ce qui réduit le risque de développement microbien quelle que soit la saison ([voir les paragraphes 6.1.2.1 et 6.2.2.1](#)).
- Le rôle du pare-vapeur est essentiel dans la construction en laine de bois afin d'assurer cette bonne gestion de l'humidité. Ainsi, s'il était besoin de le rappeler, la conception de la paroi et sa réalisation doivent être pensées pour assurer une bonne gestion de l'humidité ([voir les paragraphes 5.2.2.3 et 5.2.2.4](#)).

7.1.3. Emissions des matériaux et des parois

Les émissions des matériaux – biosourcés ou non – sont fortement corrélées aux conditions hygrothermiques auxquelles ils sont soumis. Aucune espèce spécifique de COV_m pouvant caractériser exclusivement le développement de micro-organismes n'a pu être mise en évidence, balayant dans le cadre de cette étude l'hypothèse d'une possible signature chimique de la présence de moisissures. De même, aucune espèce n'a pas été mise en évidence en émission de paroi pour caractériser la présence d'isolant biosourcé à l'intérieur de paroi.

En résumé :

- Il n'y a pas d'espèce spécifique émise identifiée pour les matériaux biosourcés et / ou pour le développement microbien, même si les matériaux avec de forte charge organique émettent davantage (ex : la laine de bois). Les émissions constatées *in situ* et en laboratoire sur les parois n'ont donc pas pu être reliées à la présence de micro-organisme, même en présence de développement fongique dans la paroi dégradée isolée par l'intérieur en laine de bois (reconstitution de la paroi du site n°1 avec des défauts et en conditions hygrothermiques très dégradées). Ainsi, soit les émissions sont bloquées par la couche de parement, soit elles sont émises à travers le parement de façon si faible qu'elles ne sont pas détectées ([voir paragraphes 4 et 5.2](#)).
- Ainsi, la signature chimique microbienne envisagée n'est, à ce stade, pas réalisable ([voir paragraphes 4 et 5.2](#)).
- Une autre hypothèse aurait également pu être la suivante : les émissions des autres sources sont si élevées qu'elles masquent les émissions des micro-organismes. Néanmoins, sur les sites suivis, hormis sur la campagne été du site n°2, les émissions relevées restaient assez faibles. Rappelons qu'il n'y a pas de signature chimique identifiée permettant de façon certaine de discriminer les émissions provenant de développement microbien ou d'un matériau ([voir paragraphes 4 et 5.2](#)).
- Les matériaux ne sont pas forcément la source majoritaire des COV (composés organiques volatils) de l'air ambiant ([voir les paragraphes 6.1.3.3 et 6.2.3.3](#)).
- Les émissions sont très sensibles à la variation de l'humidité relative (essentiellement) mais aussi de la température. Il y a ainsi une forte variation saisonnière des émissions ([voir paragraphe 5](#)).
- De même, de fortes variations ont été constatées selon l'exposition de la paroi, et donc des conditions hygrothermiques dans la paroi ([voir paragraphe 5](#)).
- Les émissions des matériaux seules ne sont pas toujours directement comparables aux émissions des parois ([voir paragraphe 5.2.4](#)).
- A noter que les émissions des matériaux ne sont pas que selon une seule direction, les émissions sont poly-directionnelles, ce qui explique en partie une non-proportionnalité directe entre les émissions des matériaux seuls et les émissions des parois. De plus, la diffusion lors des mesures avec les cellules FLECs est limitée par les différentes couches constituant le mur, un effet négligeable en CLIMPAQ ([voir paragraphe 5.2.4](#)).

7.1.4. Polluants retrouvés dans l'air intérieur

Aucune espèce n'a été mise en évidence pour caractériser la présence d'isolant biosourcé en intérieur de paroi dans l'air intérieur. En ce sens, la présence d'isolant biosourcé en intérieur de paroi ne semble dégrader ni plus ni moins l'air intérieur, même si les émissions des isolant biosourcés peuvent être à l'origine d'émissions plus importantes en COV en particulier lorsque ces matériaux intègrent des charges organiques importantes.

En résumé :

- Aucune espèce spécifique n'a été identifiée dans l'air intérieur pour marquer la présence de matériaux biosourcés, même si les matériaux avec de fortes charges organiques émettent davantage (par exemple : le bois émet davantage d' α -pinène, de limonène, etc. (monoterpènes)) ([voir les paragraphes 6.1 et 6.2](#)).
- Sur le terrain, il reste une difficulté à dé-corréler les différents paramètres environnementaux influençant les émissions car ils sont nombreux (température, humidité, orientation de la paroi) ([voir les paragraphes 6.1.3.3 et 6.2.3.3](#)).
- Les émissions sur site sont plus faibles que les émissions des matériaux seuls et neufs. Un « épuisement » / vieillissement des matériaux a ainsi été constaté. Attention, certains matériaux sont cachés par un matériau intermédiaire pouvant servir de « tampon » et adsorber les espèces émises dans la paroi (ex : les isolants ne sont pas en contact direct avec l'air intérieur, par un exemple sur le site n°1, 2 couches de plaque de plâtre de type BA18 se situent entre l'isolant et l'air intérieur) ([voir les paragraphes 6.1.2.2 et 6.2.2.2](#)).
- Les sources externes liées aux activités des occupants peuvent être largement prédominantes et peuvent totalement masquer / perturber les émissions (désorption liée à une adsorption préalable sur les parois, etc.) => il convient de privilégier les lavages à l'eau claire ou avec des produits peu émissifs et peu concentrés. Il est également recommandé de ne pas chercher à désinfecter le sol qui sera, de toute façon, contaminé au premier passage quel que soit le nettoyage réalisé ([voir le paragraphe 6.2.3.3](#)).

- Les matériaux ne sont pas forcément la source majoritaire des COV de l'air ambiant ([voir les paragraphes 6.1.3.3 et 6.2.3.3](#)).
- Le système de ventilation (et plus généralement le renouvellement de l'air) joue un rôle essentiel dans la dilution des concentrations des polluants dans l'air intérieur (par exemple durant la campagne estivale réalisée sur le site de Moncheaux ou encore durant la campagne hivernale réalisée sur le site du groupe scolaire). Ainsi il est possible de constater très clairement une dynamique temporelle des concentrations en COV qui ont tendance à augmenter en période nocturne lorsque les taux de ventilation sont diminués et conduisant donc à une accumulation des espèces associées aux sources fixes telles que le bâti. A noter que sur le site n°1, les débits constatés étaient plus faibles que les débits attendus, tandis que les débits de ventilation du second site étaient peu stables ([voir les paragraphes 6.1.1 et 6.2.1](#)).
- Il n'y a pas de lien direct entre les émissions des différentes surfaces et les concentrations ambiantes (par exemple pour l'acide acétique du site de la mairie de Moncheaux ([voir le paragraphe 6.1.3.3](#))).
- Les déterminants des concentrations en COV en air intérieur sont multiples et complexes (sources multiples, sources intérieures et extérieures, lien entre parois et concentrations en air intérieur non aisé, etc.) ([voir les paragraphes 6.1.2, 6.1.3, 6.2.2 et 6.2.3](#)).

Une foire aux questions complémentaire est présentée en [Annexe 7](#).

7.2. Modèle simplifié et exemple d'application

Dans cette partie, nous présentons un modèle simplifié permettant de proposer des solutions acceptables de ventilation des locaux à destination des concepteurs et un ordre de grandeur du débit de renouvellement d'air à obtenir (en phase de pré-projet). Ce modèle, qui suppose que l'air est parfaitement mélangé, est très utile pour simuler simultanément la consommation énergétique et la qualité de l'air intérieur.

7.2.1.1. Description du modèle et hypothèses

Les hypothèses liées à ce modèle simplifié sont :

- l'air de la pièce est parfaitement mélangé,
- la sorption de CO₂ ou COV par les matériaux est négligée,
- les réactions chimiques ne sont pas prises en compte,
- l'impact de la température et de l'humidité relative sur les émissions des matériaux est négligé.

Le bilan massique de la concentration de CO₂ ou COV peut alors être exprimé comme suit:

$$V \frac{\partial C}{\partial t} = Q(C_o(t) - C(t)) + G(t)$$

Où :

- C_o(t) est la concentration de CO₂ (ou COV) extérieure (mg/m³)
- C(t) est la concentration de CO₂ (ou COV) intérieure à l'instant t (mg/m³)
- V est le volume de la pièce (m³)
- Q est le débit de ventilation (m³/s)
- G est la source de CO₂ (ou COV) (mg/s)

7.2.1.2. Application du modèle

Nous allons appliquer le modèle pour l'atelier 7 du groupe scolaire. Les dimensions de l'atelier 7 sont les suivantes:

- Surface utile : 20.58 m² (S=4.15*4.96 m²)
- Hauteur (hors faux-plafond suspendu) : 3.6 m
- Le volume : 74 m³

En **régime dynamique**, l'équation ci-dessus permet de déterminer le profil de CO₂ ou COV intérieur en fonction du temps.

Exemple 1 : Application pour déterminer le profil de CO₂

On considère :

- Atelier occupé de 8h à 18h
- Deux configurations étudiées: atelier occupé par 10 personnes, taux de ventilation de 2 1/h (**config 1**) ou taux de ventilation de 1 1/h (**config 2**)
- Sources CO₂ émises par personnes: 9,27 mg/personne/s (ASHRAE 62)
- Concentration extérieure de CO₂ : 300 ppm (ou 540 mg/m³)

Résultat obtenu :

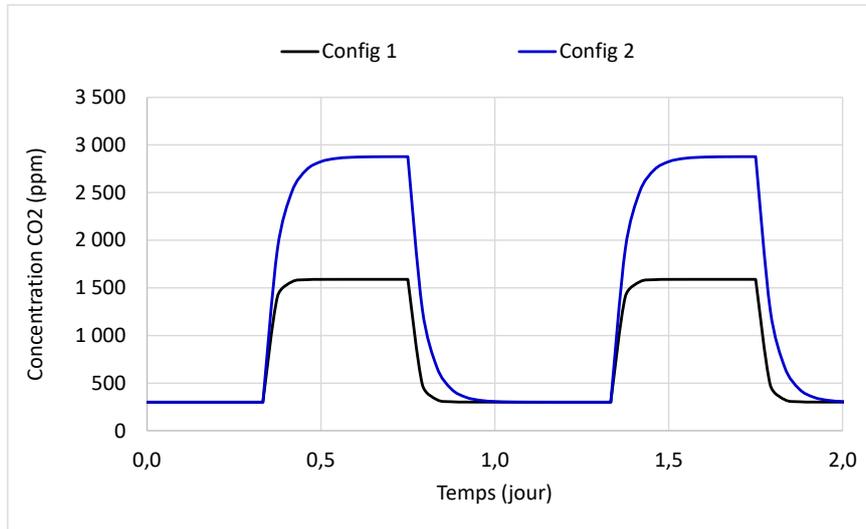


Figure 65: Concentration de CO₂ intérieure en fonction du temps pendant 2 jours. Université de Picardie

En régime permanent, nous avons $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ et par conséquent :

$$C(t) = C_o(t) + G(t)/Q \text{ ou } Q = \frac{G(t)}{C(t) - C_o(t)}$$

Cette formule permet de calculer le débit d'air nécessaire pour maintenir la concentration du CO₂ ou COV souhaitée ou de calculer la concentration de CO₂ ou COV en régime permanent.

Exemple 2 : Application pour CO₂

Si on veut une concentration de CO₂ intérieure de 1000 ppm (donc 1800 mg/m³), il faut un débit de ventilation :

- Atelier occupé par 10 personnes : $Q = \frac{9,27 \cdot 10}{1800 - 540} = 0,0736 \text{ m}^3/\text{s}$ ou 267.8 m³/h ou un taux de ventilation de 3.57 (1/h).
- Atelier occupé par 5 personnes : $Q = \frac{9,27 \cdot 5}{1800 - 540} = 0,0368 \text{ m}^3/\text{s}$ ou 132.4 m³/h ou un taux de ventilation de 1.8 (1/h).

Exemple 3 : Application pour Formaldéhyde

On considère :

- Concentration de formaldéhyde extérieure: 1.4 µg/m³
- La source de formaldéhyde émise par les matériaux est 257.2 µg/h (Le calcul est fait en se basant sur les mesures réelles (paragraphe 6) et les surfaces effectives. Les données sont précisées sur le tableau ci-dessous).

Tableau 27: Données réelles d'entrées pour la simulation réalisée. Source : Université de Picardie

	Paroi	SE	SO	NO	Sol	Plafond
Taux émission (µg/(m ² .h))	2,6	1,6	4,7	1,4	1,7	3,7
Surface effective S (m ²)	15,2	16,7	12,0	16,7	20,6	20,6

On va appliquer pour l'atelier 7/8 présenté en dessus.

- Si on veut **une concentration de formaldéhyde intérieure de 10 µg/m³ (recommandée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS))**, 10 µg/m³ comme valeur « cible » à atteindre dans 10 ans, il faut un débit de ventilation :

$$Q = \frac{257.2}{10^{-1.4}} = 29.9 \text{ m}^3/\text{h} \text{ ou un taux de ventilation de } 0.4 \text{ (1/h).}$$

8. Enseignements & Perspectives

8.1. Tableau récapitulatif des enseignements

En résumé, voici un tableau récapitulatif des enseignements principaux de ce projet :

Tableau 28: Tableau récapitulatif des conclusions collectives du projet EmiBio. Source: Cerema

Ouate de cellulose / laine de bois	Air intérieur	Paroi	Matériau
<p>Présence / développement de micro-organismes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mur en laine de bois : si bonne gestion de l'humidité relative dans le matériau et la paroi, le développement microbien reste faible voire nulle. En revanche, en conditions dégradées, la croissance microbienne aura lieu malgré les produits anti-fongiques contenus dans la laine de bois. • Mur en ouate de cellulose : pas de développement microbien constaté sur le matériau, quelles que soient les conditions hygrothermiques auxquelles le matériau a été soumis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Si l'humidité relative est maîtrisée, il n'y a pas de développement de micro-organismes dans la laine de bois • Quel que soit le couple température / humidité relative, il n'y a pas de développement fongique dans la ouate de cellulose 	<ul style="list-style-type: none"> • Le rôle du pare-vapeur est essentiel dans la construction en laine de bois afin d'assurer cette bonne gestion de l'humidité • Conception / réalisation de la paroi essentielle à la bonne gestion de l'humidité et donc à la limitation des émissions
<p>Transferts hygrothermiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Conditions hygrothermiques relevées dans l'air sans anomalies sur chacun des 2 sites, en été comme en hiver (fortes chaleurs néanmoins sur le premier site en été 2019) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de risque de condensation dans les parois constatées sur chacun des 2 sites, ce qui réduit le risque de développement microbien quelle que soit la saison. 	<ul style="list-style-type: none"> • Il n'y a pas d'espèce spécifique émise identifiée pour les matériaux biosourcés et / ou pour le développement microbien, même si les matériaux avec de fortes charges organiques émettent davantage (ex : la laine de bois). • La signature chimique microbienne envisagée n'est, à ce stade, pas réalisable. • Les matériaux ne sont pas forcément la source majoritaire des COV (composés organiques volatils) de l'air ambiant. • Les émissions des matériaux ne sont pas que selon une seule direction, les émissions sont poly-directionnelles, ce qui explique en partie une non-proportionnalité directe entre les émissions des matériaux seuls et les émissions des parois. De plus, la diffusion lors des mesures avec les FLEC est limitée par les différentes couches constituant le mur, un effet négligeable en Climpaq.
<p>Polluants détectés (air) / émissions de polluants (paroi & matériau)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune espèce spécifique n'a été identifiée dans l'air intérieur pour marquer la présence de matériaux biosourcés, même si les matériaux avec de fortes charges organiques émettent davantage (ex : le bois). • Sur le terrain, il reste une difficulté à dé-corréler les différents paramètres environnementaux influençant les émissions car ils sont nombreux (température, humidité, orientation de la paroi, etc.). • Les émissions sur site sont plus faibles que les émissions des matériaux seuls et neufs. Un « épuisement » / vieillissement des matériaux a ainsi été constaté. Attention certains matériaux sont cachés par un matériau intermédiaire pouvant servir de « tampon » et adsorber les espèces émises dans la paroi. • Les sources externes liées aux activités des occupants peuvent être largement prédominantes et peuvent totalement masquer / perturber les émissions (desorption liée à une adsorption préalable sur les parois, etc.). • Le système de ventilation (et plus généralement le renouvellement de l'air) joue un rôle essentiel dans la dilution des concentrations des polluants dans l'air intérieur. • Il n'y a pas de lien direct entre les émissions des différentes surfaces et les concentrations ambiantes. • Les déterminants des concentrations en COV en air intérieur sont multiples et complexes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les émissions sont très sensibles à la variation de l'humidité relative (essentiellement) mais aussi de la température. Il y a ainsi une forte variation saisonnière des émissions. • De même, de forte variation ont été constatées selon l'exposition de la paroi, et donc des conditions hygrothermiques dans la paroi. • Les émissions constatées in situ et en laboratoire sur les parois n'ont pas pu être reliées à la présence de micro-organisme, même en présence de développement fongique dans la paroi isolée par l'intérieur en laine de bois. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les émissions sont très sensibles à la variation de l'humidité relative (essentiellement) mais aussi de la température. Il y a ainsi une forte variation saisonnière des émissions. • De même, de forte variation ont été constatées selon l'exposition de la paroi, et donc des conditions hygrothermiques dans la paroi. • Les émissions constatées in situ et en laboratoire sur les parois n'ont pas pu être reliées à la présence de micro-organisme, même en présence de développement fongique dans la paroi isolée par l'intérieur en laine de bois.

8.2. Limites – Recommandations – Perspectives

Limites :

La limite essentielle de ce projet est directement liée à l'ampleur de l'instrumentation déployée : seuls deux sites ont été étudiés, 1 par isolant, ce qui empêche une comparaison entre plusieurs bâtiments isolés en laine de bois d'une part et isolés en ouate de cellulose d'autre part. Cet axe, voulu dès la conception du projet, était un choix scientifique : la première étude de ce type se devait d'être complète en terme de méthodologie et donc sur un panel restreint. L'instrumentation déployée a ainsi été la plus complète possible et exigeante, tant en terme de moyens matériels qu'humains et financiers. Il serait donc intéressant de compléter cette étude par des études complémentaires plus légères.

De plus, l'équipe ne disposait pas des informations précises quant à la composition exacte des matériaux isolants biosourcés mis en place sur site (composition chimique non révélée par les fournisseurs). Si les matériaux achetés pour réaliser les tests à l'échelle matériaux et parois ont été scrupuleusement choisis pour être les mêmes (marque, modèle) que ceux mis en place sur sites réels, il n'est pas exclu que la composition dans le temps ait évolué, même à la marge (l'équipe s'est renseignée auprès des fournisseurs, mais un doute raisonnable subsiste).

Enfin, malgré toutes les précautions prises, sur le terrain persiste une difficulté à dé-corréler les différents paramètres environnementaux influençant les émissions car ils sont nombreux (température, humidité, orientation de la paroi).

Recommandations :

Quelques recommandations sont proposées ici :

- Moyens analytiques : les moyens analytiques sont essentiels à la bonne réalisation de ce type de projet – l'effort analytique fourni ici a été très conséquent. Il est bien sûr essentiel de prendre garde dès la phase de conception du projet, aux moyens analytiques à déployer en fonction des objectifs visés par le projet, mais aussi d'être prêts à les faire évoluer en cours de projet. Chaque appareil a ses limites, ses avantages et ses inconvénients qu'il convient de compenser avec d'autres appareils – cela a été nécessaire dans ce projet. Par exemple, lors de la mise en place de la méthodologie d'analyse des polluants de l'air intérieur, l'équipe projet a estimé nécessaire de compléter les mesures initialement prévues par des mesures complémentaires. En effet, le GC Companion est un chromatographe de terrain à capteur FID permet un screening des composés organiques, capable d'une analyse toutes les 90 minutes. Cependant, il ne permet pas une identification aisée des composés (nécessité de passer des étalons pré-identifiés et de comparer les résultats à ces étalons) et ses résultats sont moins précis qu'un chromatographe de laboratoire. Afin de compenser ces 2 inconvénients, l'équipe a complété ses mesures par une série de prélèvements par pompage actif pendant 24 heures sur tubes Tnax avec une analyse ultérieure en laboratoire permettant une quantification plus précise et une identification des espèces en présence. Cela a permis de confirmer les identifications du GC Companion mais aussi de compenser des pertes de données durant les campagnes ou de mettre en évidence des défauts de mesure. De plus, sur le second site, les concentrations de COV dans l'air extérieur ont été mesurées pendant 24 heures par pompage actif également afin d'estimer les contributions de l'air extérieur aux concentrations de COV dans l'air intérieur.
- Règles de l'art : s'il était nécessaire de le rappeler, ce projet a permis de mettre en évidence l'importance du respect des règles de l'art pour le montage d'une paroi isolée par l'intérieur en laine de bois ainsi que le rôle essentiel du pare-vapeur dans la pérennité du matériau et la bonne gestion de son humidité relative (et donc, à terme, d'éviter le développement microbien). La gestion de l'humidité est la clef !
- En cas d'inondation : en cas d'inondation, laisser sécher les matériaux de structure est impératif, mais pour les matériaux tels que les isolants, il semble que leur remplacement soit indispensable. En effet, si la laine de verre perd ses qualités thermiques lorsqu'elle a été mouillée (tassement), la laine de bois devient le siège de développement microbien qu'il sera alors difficile d'enrayer.
- Nettoyage : suite au constat réalisé sur le second site (groupe scolaire) durant la campagne estivale, il convient de privilégier les lavages à l'eau claire ou avec des produits très peu émissifs et peu concentrés. Désinfecter le sol semble très peu utile car celui-ci sera contaminé au premier passage, quel que soit le nettoyage réalisé. En revanche, les produits utilisés pour la désinfection des sols sont très fortement émissifs.

Perspectives :

Une interrogation subsiste quant aux produits anti-fongiques de la laine de bois, car en cas d'humidité relative importante, le développement microbien sera tout de même possible. Ceci n'est certes pas le cas sur la ouate de cellulose, mais elle est composée à plus de 10 % en masse de sulfate de magnésium et de 4 à 5 % d'acide borique.

En perspective, il serait intéressant de pousser cette expérimentation de deux manières:

- Tout d'abord en la reproduisant sur un panel plus important de constructions en se restreignant aux émissions des matériaux seuls et à des mesures sur site allégées afin de valider sur un échantillon plus important les conclusions de ce projet.
- Mais surtout, il serait judicieux de reproduire cette expérimentation avec d'autres matériaux biosourcés en développement, tels que le béton de chanvre projeté et en blocs, ou encore la paille (moins répandue mais avec un potentiel de développement et un coût intéressant [25]).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AFNOR - Association française de normalisation, *Norme NF EN 16575 Octobre 2014 : Produits biosourcés - Vocabulaire*. 2014.
- [2] Nomadéis for the Ministry of Ecology, "Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction (à l'exception du bois) Etat des lieux économique du secteur et des filières," 2017.
- [3] ISO 16000-9, *Indoor air — Part 9: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing — Emission test chamber method*. 2006.
- [4] ISO 16000-10, *Indoor air — Part 10: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing — Emission test cell method*. 2006.
- [5] J. Pohleven, M. D. Burnard, and A. Kutnar, "Volatile organic compounds emitted from untreated and thermally modified wood - A review," *Wood Fiber Sci.*, vol. 51, no. 3, pp. 231–254, 2019.
- [6] M. Sassoli, C. Taiti, W. G. Nissim, C. Costa, S. Mancuso, P. Menesatti, and M. Fioravanti, "Characterization of VOC emission profile of different wood species during moisture cycles," *IForest*, vol. 10, no. 3, pp. 576–584, 2017.
- [7] B. J. Kelman, L. J. Swenson, L. V. Uppala, J. M. Cohen, J. R. Millette, and W. F. Mueller, "Chemical components of shredded paper insulation: A preliminary study," *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 14, no. 3, pp. 192–197, Mar. 1999.
- [8] F. Kačík, V. Vel'Ková, P. Šmíra, A. Nasswetrová, D. Kačíková, and L. Reinprecht, "Release of terpenes from fir wood during its long-term use and in thermal treatment," *Molecules*, vol. 17, no. 8, pp. 9990–9999, Aug. 2012.
- [9] T. Adamová, J. Hradecký, and M. Pánek, "Volatile organic compounds (VOCs) from wood and wood-based panels: Methods for evaluation, potential health risks, and mitigation," *Polymers*, vol. 12, no. 10. MDPI AG, pp. 1–21, 01-Oct-2020.
- [10] M. Makowski and M. Ohlmeyer, "Influences of hot pressing temperature and surface structure on VOC emissions from OSB made of Scots pine," in *Holzforschung*, 2006, vol. 60, no. 5, pp. 533–538.
- [11] A. O. Barry, D. Corneau, C. Corp, and C. Ste-Foy, "Volatile Organic Chemicals Emissions from OSB as a Function of Processing Parameters," 1999.
- [12] C. C. Lin, K. P. Yu, P. Zhao, and G. Whei-May Lee, "Evaluation of impact factors on VOC emissions and concentrations from wooden flooring based on chamber tests," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 3, pp. 525–533, 2009.
- [13] P. Harb, N. Locoge, and F. Thevenet, "Emissions and treatment of VOCs emitted from wood-based construction materials : Impact on indoor air quality," *Chem. Eng. J.*, vol. 354, no. April, pp. 641–652, 2018.
- [14] R. M. Stephenson, "Mutual Solubility of Water and Aldehydes," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 38, no. 4, pp. 630–633, 1993.
- [15] W. Liang, M. Lv, and X. Yang, "The effect of humidity on formaldehyde emission parameters of a medium-density fiberboard: Experimental observations and correlations," *Build. Environ.*, vol. 101, pp. 110–115, 2016.
- [16] S. Moularat, E. Robine, O. Ramalho, and M. A. Oturan, "Detection of fungal development in closed spaces through the determination of specific chemical targets," *Chemosphere*, vol. 72, no. 2, pp. 224–232, 2008.
- [17] A. Korpi, J. Järnberg, and A. L. Pasanen, "Microbial volatile organic compounds," *Crit. Rev. Toxicol.*, vol. 39, no. 2, pp. 139–193, 2009.
- [18] L. Fang, G. Clausen, and P. O. Fanger, "Impact of Temperature and Humidity on Chemical and Sensory Emissions from Building Materials," *Indoor Air*, vol. 9, pp. 193–201, 1999.
- [19] P. Wolkoff, "VOC - Sources, measurements, emissions, and the impact on indoor air quality," University of Copenhagen, 1995.
- [20] Y. K. Lee and H. J. Kim, "The effect of temperature on VOCs and carbonyl compounds emission from wooden flooring by thermal extractor test method," *Build. Environ.*, vol. 53, pp. 95–99, 2012.
- [21] World Health Organization, "Concise International Chemical Assessment Document 26: Benzoic Acid and Sodium Benzoate," 2005.
- [22] E. V. Bräuner, M. Frederiksen, B. Kolarik, and L. Gunnarsen, "Typical benign indoor aerosol concentrations in public spaces and designing biosensors for pathogen detection: A review," *Build. Environ.*, vol. 82, pp. 190–202, 2014.
- [23] D. Haas, J. Habib, J. Luxner, H. Galler, G. Zarfel, R. Schlacher, H. Friedl, and F. F. Reinthaler, "Comparison of background levels of culturable fungal spore concentrations in indoor and outdoor air in southeastern Austria," *Atmos. Environ.*, vol. 98, pp. 640–647, 2014.
- [24] A. M. Monroy-Tobon, "Etude de la potentialité du développement de micro-organismes sur des matériaux d'isolation bio-sourcés et conventionnels utilisés dans la rénovation de bâtiments : impacts sur la qualité de l'air intérieur," Loire Bretagne University, 2020.
- [25] ADEME Magasine, Ecostrav simplie la construction bois-paille, février 2022.
- [26] Expertises.ademe.fr
- [27] Matériaux bio-sourcés - Fibres de bois et ouate de cellulose en tête du peloton, Le Moniteur, 2012

VALORISATION DU PROJET EMIBIO

Anh Dung Tran Le, Cécile Caudron and Thierry Langlet¹, Effect of TVOC and moisture buffering capacities of particle board on indoor relative humidity and TVOC concentration, article, 6p, 2019

Qualité de l'air intérieur et matériaux biosourcés, quel impact sur la santé ?, dossier Ingénierie territoriale n°53 Qualité de l'air, 3p, 2020

Cécile Caudron, Article Le projet EmiBio : la deuxième campagne de mesures *in situ* a été réalisée, Dossier Biosourcés #23, Construction 21, 2020

Healthy Buildings 2021 :

Tamara BRAISH, Laurence DEPELCHIN, Vincent GAUDION, Yves ANDRES, Thierry LANGLET, Anh Dung Tran LE, Cécile CAUDRON, Liselotte TINEL and Nadine LOCOGE, Monitoring Mold growth and VOC Emissions from Wood Wool Insulations under Unfavorable Hygrothermal Conditions, conference proceeding (185), 7p, 2021

Tamara Braish, Laurence Depelchin, Ana Maria Tobon-Monroy, Yves Andres, Cécile Caudron and Nadine Locoge, The effect of Relative Humidity on the Emission of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Building Materials, short paper, 4p, 2021

Une présentation orale a été réalisée dans cette conférence.

Atmos'Fair 2021 :

Tamara Braish, Laurence Depelchin, Vincent Gaudion, Cécile Caudron and Nadine Locoge, Assessment of Volatile Organic Compounds (VOC) Emissions in Public Buildings: Seasonal Field Campaigns, short paper, 2p, 2021.

Une présentation orale a été réalisée dans cette conférence.

Indoor Air 2022 :

Tamara Braish, Liselotte Tinel, Vincent Gaudion, Cécile Caudron and Nadine Locoge, Emission of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Buildings containing Bio-based Insulation Materials, short paper, 2p, 2022

Une présentation orale a été réalisée dans cette conférence.

Rencontre Universitaire du Génie Civil 2022 :

Cécile Caudron, Franck Brachelet, Emmanuel Antczak, Nadine Locoge, Yves Andrès, Liselotte Tinel, Tamara Braish, Lucie Deroo, Thierry Langlet et Anh Dung Tran Le, Etude des émissions dans l'air intérieur d'une paroi isolée en laine de bois, article proposé, 4p, 2022

Une présentation orale a été réalisée dans cette conférence.

Page web :

<https://www.cerema.fr/fr/actualites/emibio-projet-recherche-emissions-materiaux-biosources>

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) du placoplâtre. Source : IMT Nord-Europe.....	18
Tableau 2 : Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) du pare-vapeur. Source : IMT Nord-Europe.....	19
Tableau 3 : Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) de la laine de bois (60mm). Source: IMT Nord-Europe	19
Tableau 4 : Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) de la laine de bois (120mm). Source: IMT Nord-Europe	20
Tableau 5 : Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) de la ouate de cellulose. Source: IMT Nord-Europe	20
Tableau 6 : Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) du panneau OSB. Source : IMT Nord-Europe	21
Tableau 7: Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) de COV à différentes HR et temps après l'introduction (T0) de l'ossature bois. Source : IMT Nord-Europe.....	22
Tableau 8: Synthèse des murs étudiés. Source: Université de Picardie	24
Tableau 9: T, HR, Pv et HA moyennes pour chaque point de mesure du mur M_norm. Source : Université de Picardie	26
Tableau 10: T, HR, Pv et HA moyennes pour chaque point de mesure du mur M_norm. Source : Université de Picardie	26
Tableau 11: T, HR, Pv et HA moyennes pour chaque point de mesure du mur M_dégrad. Source : Université de Picardie ...	27
Tableau 12: T, HR, Pv et HA moyennes pour chaque point de mesure du mur M_conv. Source : Université de Picardie	28
Tableau 13: Résultats des différentes campagnes expérimentales réalisées dans des conditions contrôlées (Asp : Aspergillus niger ; Pen : Penicillium sp.). Source : IMT Atlantique.....	29
Tableau 14: Evolution temporelle des taux émissions d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) en en COV du Mur_Conventionnel (Mur_conv). Source : IMT Nord-Europe.....	30
Tableau 15 : Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) en COV de la paroi biosourcée dans des conditions hygrothermiques « normales » (mur M_norm). Source : IMT Nord-Europe	32
Tableau 16: Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) en COV des 2 murs biosourcés dans des conditions hygrothermiques différentes. Source : IMT Nord-Europe	36
Tableau 17: Résumé des rapports (Ratio = T_E/T_{NE}) du taux d'émissions du potentiel COV _m de la partie ensemencée (E) au taux d'émissions de la partie non-ensemencée (NE) de la paroi soumise aux conditions hygrothermiques dégradées (mur M_dégrad). Source : IMT Nord-Europe.....	39
Tableau 18: Taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) des COV émis des 8 surfaces évaluées en été et en hiver sur le site de Moncheaux. Source : IMT Nord-Europe	56
Tableau 19: Résultats des tubes passifs sur les 2 campagnes été et hiver réalisées sur le site n°1. Source : Cerema	57
Tableau 20: Caractéristiques des milieux de culture utilisés. Source : IMT Atlantique	63
Tableau 21: Résultats des 2 campagnes de mesure des aérosols microbiens (nd = non déterminé, AM = matin ; PM = après midi). Source : IMT Atlantique	64
Tableau 22: La variation temporelle sur 24h des taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) hivernales de COV des murs orientées Sud-Est (SE) et Sud-Ouest (SO) du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe.....	72
Tableau 23: La variation temporelle sur 24h des taux d'émissions ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène) estivales de COV des murs orientées Sud-Est (SE) et Sud-Ouest (SO) du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe.....	73
Tableau 24: Taux d'émissions de COV ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) émis des 8 surfaces évaluées en été et en hiver sur le site du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe	81
Tableau 25: Résultats des tubes passifs sur les 2 campagnes été et hiver réalisées sur le site n°2. Source : Cerema	82
Tableau 26: Résultats des campagnes de mesure (<LOD : non déterminer, zone 1 = prélèvement avec Mass 100 posé sur une table, zone 2 = prélèvement à côté de la fenêtre, zone 3 = prélèvement à proximité du point d'eau ; <LOD = non déterminé, AM = matin ; PM = après-midi). Source : IMT Atlantique	86
Tableau 27: Données réelles d'entrées pour la simulation réalisée. Source : Université de Picardie	90
Tableau 28: Tableau récapitulatif des conclusions collectives du projet EmiBio. Source: Cerema	92

FIGURES

Figure 1 : Photos de la mairie de Moncheaux, vues extérieures. Gauche : photo du site. Source : site internet de la mairie de Moncheaux. Droite : bâtiment de la salle des mariages, vu de côté. Source : Cerema.....	14
Figure 2 : Schéma de principe de la constitution de la paroi extérieure de la salle des mariages. Source : Université d'Artois	15
Figure 3: Photos du groupe scolaire étudié, vues extérieures. Gauche : Vue de face. Droite : Vue de l'arrière (atelier 7/8 en surplomb) - Source : Cerema.....	16
Figure 4: Schéma de principe de la constitution de la paroi extérieure de l'atelier. Source : Université d'Artois	16
Figure 5: Mur de Moncheaux reproduits en laboratoire et les deux caissons climatiques. Source : Université de Picardie ...	25
Figure 6: Conditions des tests hygrothermiques des murs M_norm et M_défav. Source : Université de Picardie	25
Figure 7: Conditions des tests hygrothermiques du mur M_dégrad. Source : Université de Picardie	27
Figure 8: Conditions des tests hygrothermiques du mur M_conv. Source : Université de Picardie.....	28
Figure 9: Émissions temporelles des COV majoritaires émis par la partie non-ensemencée (NE) de la paroi mise en conditions hygrothermiques dégradées (Mur_M_dégrad). Source : IMT Nord-Europe	34
Figure 10: Émissions temporelles des COV majoritaires émis par la partie ensemencée (E) de la paroi mise en conditions hygrothermiques dégradées (Mur_M_dégrad). Source : IMT Nord-Europe.....	35
Figure 11: Émissions temporelles de COV microbiens (COVm) potentiels de la partie non ensemencées (NE) et la partie ensemencée de la paroi soumises à des conditions hygrothermiques dégradées (Mur_M_dégrad). Source : IMT Nord-Europe	38
Figure 12: Échantillons de ouate de cellulose ensemencés et incubés. Source : IMT Atlantique	40
Figure 13: Boîte de pétri contenant <i>Aspergillus niger</i> et <i>Penicillium</i> sp. Source : IMT Atlantique	40
Figure 14: Comparaison des émissions de COV des matériaux individuels constituant les murs biosourcés à Moncheaux aux émissions des trois parois soumises aux différentes conditions hygrothermiques. Source : IMT Nord-Europe.....	41
Figure 15: Comparaison des émissions de COV majoritaires émis par la paroi soumise aux conditions hygrothermiques normale (Mur_M_norm) aux émissions de COV par les 3 murs biosourcés dans la salle de mariage de la mairie de Moncheaux en période estivale et hivernale. Source : IMT Nord-Europe	43
Figure 16: Comparaison des émissions de COV majoritaires émis par les 3 murs biosourcés de la salle de mariage de la mairie de Moncheaux en été et en hiver aux émissions de la paroi soumise aux conditions hygrothermiques normale (Mur_M_norm). . Source : IMT Nord-Europe.....	44
Figure 17: Présentation schématique de la salle des mariages de la mairie de Moncheaux et repérage des différentes surfaces dont les émissions sont mesurées. Source: IMT Nord-Europe.....	45
Figure 18: positionnement des thermo-hygromètres au sein de la paroi. Source : Université d'Artois	46
Figure 19: Evolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi le 09/07/2019. Source : Université d'Artois..	47
Figure 20: Evolution de la température T(°C) dans l'épaisseur de la paroi le 09/07/2019. Source : Université d'Artois	47
Figure 21: Evolution de l'humidité spécifique HS (kg d'eau / kg air sec) dans l'épaisseur de la paroi le 09/07/2019. Source : Université d'Artois.....	48
Figure 22: Évolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi le 30/01/2020. Source : Université d'Artois ..	48
Figure 23: Évolution de la température T (°C) dans l'épaisseur de la paroi le 30/01/2020. Source : Université d'Artois	49
Figure 24: Évolution de l'humidité spécifique HS (kg vapeur d'eau / kg air) dans l'épaisseur de la paroi le 30/01/2020. Source : Université d'Artois.....	49
Figure 25: Évolution de la température T (°C) dans l'épaisseur de la paroi du 14/06/2019 au 08/06/2020. Source : Université d'Artois.....	50
Figure 26: Évolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi du 14/06/2019 au 08/06/2020. Source : Université d'Artois.....	50
Figure 27: Évolution de l'humidité spécifique HS (kg vapeur d'eau / kg air) dans l'épaisseur de la paroi du 14/06/2019 au 08/06/2020. Source : Université d'Artois.....	51
Figure 28: La variation spatiale des émissions de COV du mur orienté sud-est en été à Moncheaux. Source : IMT Nord-Europe	52
Figure 29: Emissions des différentes surfaces intégrant un isolant biosourcé sur le site de la mairie de Moncheaux en périodes estivale et hivernale (les barres d'erreurs représentent ± 1 écart-type si au minimum 3 mesures ont été réalisées). Source : IMT Nord-Europe.....	52
Figure 30: Émissions des différents matériaux constituant et des surfaces intégrant un isolant biosourcé sur le site de la mairie de Moncheaux en périodes estivale et hivernale (avec taux d'émissions > 1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ éq. toluène). Source : IMT Nord-Europe.....	54
Figure 31: Chromatogramme du 11 juillet 2019 à 6h30. Les pics notés A, B, C et D ont ceci de particulier qu'ils augmentent le jour et diminuent la nuit, contrairement aux autres. Source : Cerema.....	58
Figure 32: Graphique représentant l'évolution des concentrations de 11 COV suivis par le GC sur deux nuits. L'alpha-pinène est nettement majoritaire, suivi de l'acide acétique. Source : Cerema.....	58
Figure 33: Chromatogramme du 3 mars 2020 vers 6h, en fin de week-end, le plus net de la campagne d'hiver. Les temps d'éluion (en min) tiennent lieu d'échelle. Source : Cerema	59
Figure 34: Graphique représentant l'évolution des paramètres suivis par la balise environnementale Fireflies au cours de la campagne d'été à Moncheaux. Source : Cerema	59
Figure 35: Comparaison des deux campagnes (été/hiver) réalisées à Moncheaux. Evolution des concentrations en COV légers, totaux, et CO ₂ mesurés par la balise Fireflies. Source : Cerema	60

Figure 36: Évolutions temporelles sur 24h des concentrations en quelques COV (durées de prélèvement intégrées de 3 heures) les 18 et 19 juillet 2019 sur le site de la mairie de Moncheaux. Source : IMT Nord-Europe.....	61
Figure 37: Évolutions temporelles sur 24h des concentrations en quelques COV (durées de prélèvement intégrées de 3 heures) les 4 et 5 février 2020 sur le site de la mairie de Moncheaux. Source : IMT Nord-Europe	61
Figure 38: Mise en regard des émissions des différentes surfaces (axe des ordonnées gauche) et des concentrations mesurées en air intérieur (axe des ordonnées droit) sur le site de la mairie de Moncheaux lors de la campagne estivale. Source : IMT Nord-Europe.....	62
Figure 39: Mise en regard des émissions des différentes surfaces (axe des ordonnées gauche) et des concentrations mesurées en air intérieur (axe des ordonnées droit) sur le site de la mairie de Moncheaux lors de la campagne hivernale. Source : IMT Nord-Europe.....	62
Figure 40: Mass 100 en condition d'échantillonnage. Source : IMT Atlantique	64
Figure 41: Exemple de réponse sur gélose MEA (fongique). Source : IMT Atlantique	64
Figure 42: Présentation schématique de l'atelier du groupe scolaire et repérage des différentes surfaces dont les émissions sont mesurées. Source: IMT Nord-Europe	65
Figure 43: Positionnement des thermo-hygromètres au sein de la paroi. Source : Université d'Artois	65
Figure 44: Évolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi le 15/07/2020. Source : Université d'Artois..	66
Figure 45: Évolution de la température T(°C) dans l'épaisseur de la paroi le 15/07/2020. Source : Université d'Artois	66
Figure 46: Évolution de l'humidité spécifique HS (kg d'eau / kg air sec) dans l'épaisseur de la paroi le 15/07/2020. Source : Université d'Artois.....	67
Figure 47: Évolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi le 27/02/2021. Source : Université d'Artois..	67
Figure 48: Évolution de la température T (°C) dans l'épaisseur de la paroi le 27/02/2021. Source : Université d'Artois	68
Figure 49: Évolution de l'humidité spécifique HS (kg vapeur d'eau / kg air) dans l'épaisseur de la paroi le 27/02/2021. Source : Université d'Artois.....	68
Figure 50: Evolution de la température T (°C) dans l'épaisseur de la paroi du 03/02/2021 au 31/03/2022. Source : Université d'Artois.....	69
Figure 51: Evolution de l'humidité relative HR (%) dans l'épaisseur de la paroi du 03/02/2021 au 31/03/2022. Source : Université d'Artois.....	69
Figure 52: Evolution de l'humidité spécifique HS (kg vapeur d'eau / kg air) dans l'épaisseur de la paroi du 03/02/2021 au 31/03/2022. Source : Université d'Artois.....	70
Figure 53: Variation spatiale hivernale des émissions de COV du mur orienté Sud-Est (SE) du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe.....	71
Figure 54: L'évolution de l'humidité relative (en haut) et la température (en bas) dans le mur orienté Sud-Est (SE) du groupe scolaire pendant les 24 heures de prélèvement de COV en hiver (25-26/02/2021) (cf. § 6.2.2.1). Source : IMT Nord-Europe	74
Figure 55: L'évolution de l'humidité relative (en haut) et la température (en bas) dans le mur orienté Sud-Est (SE) du groupe scolaire pendant les 24 heures de prélèvement de COV en été (20-21/07/2021) (cf. § 6.2.2.1). Source: IMT Nord-Europe ..	75
Figure 56: Emissions (A) en acides, (B) en COV majoritairement quantifiés des différentes surfaces intégrant un isolant biosourcé sur le site du groupe scolaire en périodes estivale (rouge) et hivernale (bleu) (à noter que l'échelle sur l'axe des Y n'est pas la même pour A et B). Source : IMT Nord-Europe.....	76
Figure 57: Comparaison des émissions de COV majoritaires (> 1 µg.m-2.h-1 éq. toluène) émis par les matériaux individuels constituant les murs biosourcés avec leur taux d'émissions sur site du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe.....	78
Figure 58: Comparaison des émissions de COV majoritaires (> 1 µg.m-2.h-1 éq. toluène) mesurés sur site du groupe scolaire en période estivale aux émissions des matériaux individuels constituant les murs biosourcés. Source : IMT Nord-Europe ..	79
Figure 59: évolution des paramètres relevés par la balise NEMO au cours de la campagne d'hiver sur le groupe scolaire. Source : Cerema	82
Figure 60: Relevés de la balise fireflies sur le site du groupe scolaire, en été et en hiver. Source : Cerema	83
Figure 61: Évolutions temporelles des concentrations en quelques COV (durées de prélèvement intégrées de 3 heures) les 4 et 5 mars 2021 sur le site du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe	84
Figure 62: Évolutions temporelles des concentrations en quelques COV (durées de prélèvement intégrées de 3 heures) les 12 et 13 juillet 2021 sur le site du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe	84
Figure 63: Mise en regard des émissions des différentes surfaces (axe des ordonnées gauche) et des concentrations mesurées en air intérieur (axe des ordonnées droit) sur le site du groupe scolaire lors de la campagne hivernale. Source : IMT Nord-Europe	85
Figure 64: Mise en regard des émissions des différentes surfaces (axe des ordonnées gauche) et des concentrations mesurées en air intérieur (axe des ordonnées droit) sur le site du groupe scolaire lors de la campagne estivale. Source : IMT Nord-Europe.....	86
Figure 65: Concentration de CO ₂ intérieure en fonction du temps pendant 2 jours. Université de Picardie.....	90

SIGLES ET ACRONYMES

ACERMI	Association pour la certification des matériaux isolants
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
BA	Bords amincis (ex BA18)
C	Carbone (ex C6 : 6 atomes de carbone dans la molécule)
Cerema	Centre d'études et d'expertises sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
COV	Composés organiques volatils
COVm	Composés organiques volatils microbien
CTA	Centrale de traitement d'air
éq	Equivalent (par exemple en équivalent toluène)
ERP	Etablissement recevant du public
GC FID	De l'anglais Gaz chromatography (chromatographie à phase gazeuse) / Flame ionisation detector
HQE	Haute qualité environnementale
HR	Humidité relative (%)
IMT	Institut Mines Télécom
LGCgE	Laboratoire de Génie Civil et géo-environnement (Université d'Artois)
LOD	De l'anglais Limit Of detection
LTI	Laboratoire des technologies innovantes (Université de Picardie Jules Vernes)
MFP	Panneau de particules de bois multifonction
NF EN	Norme française European norm
OSB	De l'anglais Oriented strand board (panneau)
PEFC	Programme de reconnaissance des certifications forestières
PNSE	Plan national santé environnement
QAI	Qualité de l'air intérieur
RSDT	Règlement sanitaire départemental type
UFC	Unités formant colonies
UPJV	Université de Picardie Jules Vernes
RE2020	Réglementation Environnementale 2020
RT2012	Réglementation thermique 2012
T	Température (°C)

ANNEXES

Annexe 1 – Diagnostic bâti de la mairie de Moncheaux

Introduction

Sur le site de la mairie de Moncheaux, un diagnostic du bâti et en particulier de la salle des mariages a été **réalisé le 13 juin 2019** (complété par des mesures ultérieures) afin d'affiner l'analyse des données collectées durant les deux campagnes de mesure.



Figure : Photos de la mairie de Moncheaux, vues extérieures. Gauche: photo du site - source: site internet de la mairie de Moncheaux. Droite: bâtiment de la salle des mariages, vu de côté. Source : Cerema

Le diagnostic a intégré les points suivants :

- Analyse des sources de pollution potentielles extérieures
- Analyse des sources de pollution potentielles intérieures liées aux éléments suivants :
 - o Matériaux de construction
 - o Mobilier utilisé
 - o Produits utilisés, en l'occurrence pour réaliser le ménage et fréquence d'utilisation
- Système en place, notamment la ventilation double flux de la salle des mariages
- Comportement des occupants : aération

Le site se décompose en deux bâtiments anciens, dont la structure est en briques lourdes (de 32 à 35cm d'épaisseur). Ils ont été totalement réhabilités et terminés en décembre 2013 (seuls les murs en brique ont été conservés) et reliés par une extension plus récente terminée en décembre 2013 en structure légère en bois. Les locaux ont été occupés dès janvier 2014. Les 3 bâtiments ont été isolés en parois verticales par de la laine de bois, par l'intérieur. Le bâtiment R+1 en briques claires (à gauche sur la photo) comprend le bureau du maire, des salles de réunion et d'archive. Le bâtiment central contient un open-space servant à la fois d'accueil du public et de bureaux pour les secrétaires de mairie tandis que le bâtiment en brique rouge est la salle des mariages, servant aussi de salle des conseils municipaux. Habituellement, environ 10 personnes travaillent à la mairie. L'instrumentation a été réalisée dans la salle des mariages.

Sources de pollution extérieures

La zone est rurale. Peu de pollutions spécifiques peuvent être déterminées, hormis des champs à quelques kilomètres en sortie de village – la mairie étant en centre-bourg. Dans un rayon de 100 m, aucune source de pollution n'a été relevée, seules des maisons en R+1, quelques commerces de proximité, l'école maternelle et l'école primaire voisines sont présents.



Figure : Vue du ciel de la mairie de Moncheaux et de son environnement. Source : Google Maps©2020

Sources de pollution intérieures

Les sources de pollution classiques ont pu être déterminées, à savoir des sources potentielles en provenance des matériaux, d'autres en provenance du mobilier, ou des produits d'entretien puis de l'occupation. Ainsi, voici les sources identifiées qui seront illustrées par la suite :

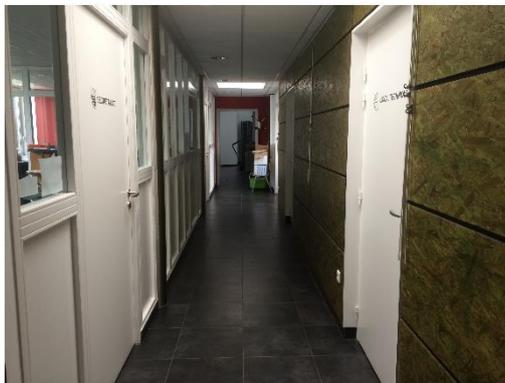
- **Matériaux :**
 - L'isolation est réalisée par l'intérieur par de la laine de bois ISONAT Flex.
 - Le parement intérieur est un doublage de BA18cm recouvert par une peinture blanche mate, sauf dans la circulation de l'extension, recouverte de panneau OSB à faible émission de COV.
 - Les fenêtres, changées en 2014, sont en bois et double-vitrage munies de rideaux intérieurs uniquement dans la salle des mariages. La porte principale est en aluminium tandis que les portes de la salle des mariages sont en PVC.
 - Le sol est carrelé dans toute la mairie, sauf dans la salle des mariages (parquet).
 - **Le plancher haut** est en faux-plafond plâtre dans les bureaux et circulations, et en tôles aluminium isolées en sous-face par du polyuréthane, posé en sous-pente dans la salle des mariages. A noter que des poutres apparentes de la structure bois sont présentes dans cette salle.



Isolation en laine de bois ISONAT FLEX



Parement intérieur BA18 (sauf circulation bâtiment nouveau)



Parement intérieur circulations en panneaux OSB basses émissions



Fenêtres en bois double-vitrage, sol parqueté et plafond en tôles aluminium isolées en sous-face + poutres en bois apparentes
Salle des mariages



Porte d'entrée aluminium et sol carrelé
Circulation et salles de réunion

Figure : Illustration des matériaux utilisés dans la mairie. Source : photos du Cerema

- **Mobilier:** le mobilier des bureaux et des salles de réunion est un mobilier classique en bois reconstitué et recouvert d'une protection plastifiée limitant les émissions en COV (tant que son intégralité est garantie).



Figure : Illustration du mobilier utilisé dans la mairie (ex : salle de réunion du rez-de-chaussée). Source : photos du Cerema

- **Produits de nettoyage:** le sol est lavé par aspiration et par nettoyage humide par une entreprise spécialisée le matin avant l'arrivée du personnel 2 fois par semaine (mercredi et samedi) dans le hall d'accueil et les WC, le mercredi matin dans les bureaux, et au besoin dans la salle des mariages et à l'étage (environ 1 fois par semaine). Les produits utilisés sont peu nombreux (5 en tout, dont l'un correspondant à des pastilles d'eau de javel utilisées de temps en temps pour les WC), mais seuls deux d'entre eux ont l'éco-label européen, à savoir les produits de nettoyage Pollet – gamme PolGreen Sani-Spray et de détartrage Boma – gamme Fix eco Swan des sanitaires, les autres n'en ont aucun. Les autres produits non labellisés sont : un produit de nettoyage des vitres par pulvérisation de marque Pollet – gamme PolTech – PolShean (peu de label sur ce type de produit), un produit de nettoyage du sol de marque Senet – gamme 2D Ambiance, et des pastilles de javel de marque Techline. A noter que les pulvérisations sont à limiter au *maximum* pour éviter qu'une grande partie du produit soit immédiatement émis dans l'air. Les pastilles de javel sont à utiliser avec parcimonie, voire même à éviter. Les autres produits constatés sont des produits de lavage de main, d'utilisation ponctuelle ou qui ne sont plus utilisés. Dans ce dernier cas de figure, il est préférable de les enlever de la salle de stockage.



Figure : Illustration des produits d'entretien et de nettoyage utilisés. Source : photos du Cerema



Figure : Illustration du stockage des produits d'entretien et de nettoyage dans une salle dédiée, rangée, fermée à clés et ventilée. Source : photos du Cerema

- **Autre matériel** : une grosse imprimante professionnelle est présente au milieu de l'open-space des secrétaires de mairie. Cette imprimante n'est pas située directement dans l'espace bureaux, mais dans un lieu de passage traversant, ce qui permet de limiter l'exposition des employés aux émissions de l'imprimante en fonctionnement.



Figure : Illustration de l'imprimante située dans le couloir. Source : photo du Cerema

- **Autre** : aucun dégât n'a été constaté dans le bâtiment (aucun problème d'humidité par exemple). Seule la présence d'un essaim d'abeilles a nécessité l'usage ponctuel de produits insecticides dans la salle des mariages en 2017.

Système de ventilation et entretien

Le système de ventilation de la mairie est une ventilation mécanique contrôlée double flux par balayage avec récupération de chaleur, datant de 2014. Celle-ci dessert également la salle des mariages. La prise d'air neuf est située en toiture, loin de toute source de pollution extérieure identifiable.



Figure : Illustration des bouches de ventilation en rez-de-chaussée (gauche) et à l'étage (milieu) et de la prise d'air neuf sur le toit (droite). Source : photo du Cerema

Les gaines sont en tôle galvanisée. Elles sont isolées, sauf les parties apparentes situées dans la salle des mariages qui sont à nu.

L'entretien de la CTA est réalisé par un prestataire extérieur sous contrat annuel. Il réalise tous les ans un changement des filtres F7, ainsi qu'un nettoyage, un dépoussiérage puis une désinfection du réseau (qui est court), intégrant le nettoyage des bouches. Cet entretien est réalisé en février ou mars de chaque année (dernier en date connu : début mars 2020).

Un système de commande à distance est situé dans une salle annexe dans l'extension de la mairie. Ce panneau de contrôle de la CTA n'indique pas d'erreur spécifique depuis sa mise en fonctionnement initiale en 2014. Néanmoins, nous avons noté un risque de dysfonctionnement l'été 2019 (CTA en déséquilibre?) qui a été signalé au technicien de la mairie. La CTA était en bon état de fonctionnement lors des tests de l'hiver 2019-2020.



Figure : A gauche : réseau des gaines de ventilation de la salle des mariages. A droite: CTA avec gaines isolées. Site n°1 – mairie de Moncheaux. Source: Cerema

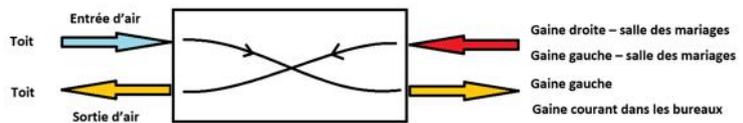


Figure : A gauche : panneau de contrôle de la centrale de traitement d'air. A droite: schéma de l'échangeur. Source: Cerema

Voici le plan du réseau de gaine de la salle des mariages du positionnement des grilles, puis le tableau des débits mesurés à l'aide d'un cône K75 associé à un fil chaud.

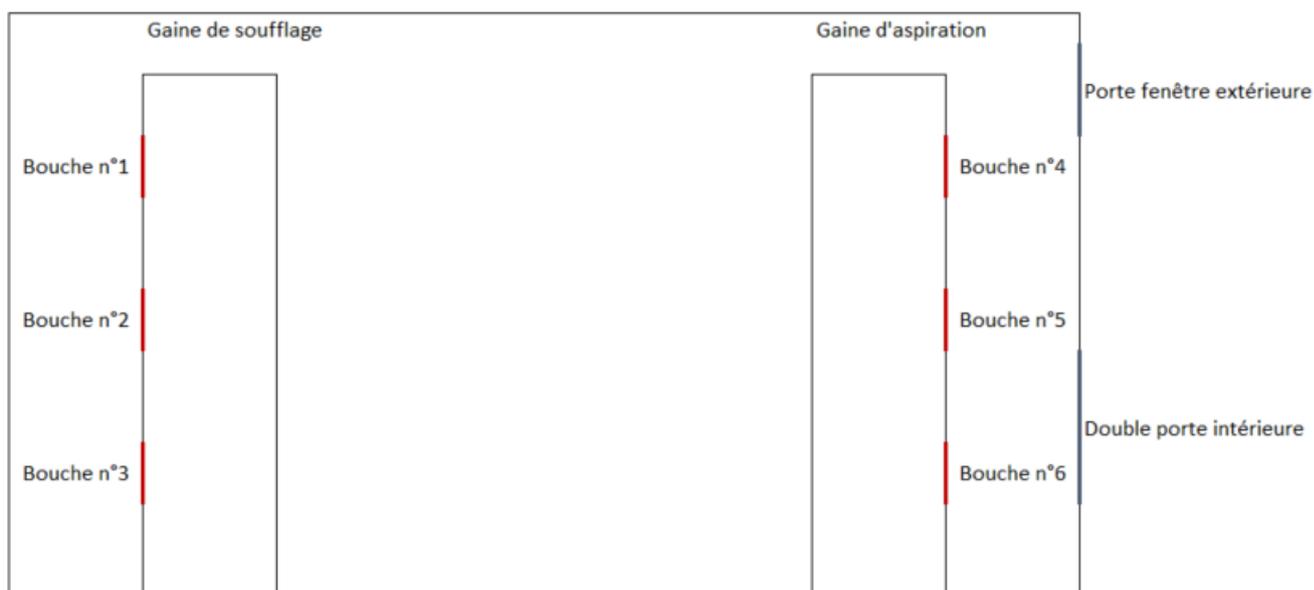


Figure : Schéma simplifié des gaines et bouches de ventilation de la salle des mariages – mairie de Moncheaux – été 2019. Source : Cerema

Débits mesurés :

Tableau : Débits mesurés aux bouches de ventilation - salle des mariages - mairie de Moncheaux - été 2019. Source : Cerema

Gaine n°1 - soufflage

	Débit mesuré (m ³ /h)				
	10h50	12h50	13h40	14h25	15h30
Bouche n°1	74	/	/	/	/
Bouche n°2	80	83	83	87	80
Bouche n°3	63	/	/	/	/

Gaine n°2 - aspiration

	Débit mesuré (m ³ /h)				
	11h30	12h50	13h40	14h25	15h30
Bouche n°4	0	/	/	/	/
Bouche n°5	21	20	23	20	19
Bouche n°6	23	/	/	/	/

Ainsi, on peut noter un déséquilibre entre l'aspiration (plus faible) et le soufflage.

A noter cependant que l'étanchéité entre le cône K75 et les bouches était imparfaite lors des mesures. Une nouvelle série de mesures avec le cône K150 (section 55cm x 10cm) – matériel le plus adapté sur le marché à ces grilles – a été réalisée lors de la campagne de mesures complémentaire de novembre 2020. Il a été étalonné en mars 2019. Ces mesures étaient initialement prévues en été 2020 mais elles ont dû être reportées suite au confinement national et au déconfinement progressif limitant les déplacements. Les mesures complémentaires sur l'ensemble des bouches ont ainsi pu être réalisées le 23 novembre 2020.

Tableau : Débits mesurés aux bouches de ventilation - salle des mariages - mairie de Moncheaux – novembre 2020. Cône K150 (étanchéité assurée). Source : Cerema

Gaine n°1 - soufflage

	Débit mesuré (m ³ /h)
Bouche n°1	60
Bouche n°2	52
Bouche n°3	61

Gaine n°2 - aspiration

	Débit mesuré (m ³ /h)
	11h30
Bouche n°4	45
Bouche n°5	50
Bouche n°6	68

Ainsi, en novembre 2020, le débit de soufflage total est de 173m³/h, tandis que le débit extrait est de 163m³/h, la salle est donc en légère surpression. Ces débits sont inférieurs aux débits prévus (environ 300m³/h en soufflage et en aspiration). Le débit de ventilation a donc été manuellement diminué en cette période de plus basse fréquentation de la salle des mariages (hypothèse privilégiée), ou alors le système de ventilation ne fonctionne pas correctement (aucune alerte technique mentionnée sur le système, pas de retour de panne de l'entreprise d'entretien à cette période).



Figure : Cône K150 et son fil chaud. Source : Cerema

Une mesure comparative entre le cône K150 et le cône K75 fait état d'un facteur de 1,9 entre les 2 cônes : le débit mesuré avec le cône K75 (étanchéité non assurée) étant partiel, il est environ 2 fois moins important que le débit mesuré avec le cône K150 (étanchéité assurée, débit intégralement pris en compte dans le fil chaud).

En complément, et à titre informatif, des mesures de débit ont été réalisées à chaque bouche de la mairie, dont voici les résultats :

Tableau : Débits mesurés aux bouches de ventilation – hors salle des mariages - mairie de Moncheaux - été 2019. Source : Cerema

	Salle	Débit mesuré (m³/h)	Mode	Appareil utilisé	Date relevé
Rez-de-chaussée	Couloir salle d'attente – face porte d'entrée	25	Extraction	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
	Couloir – proche accueil	30	Extraction	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
	WC entrée	40	Extraction	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
	Salle de stockage	19	Extraction	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
	Cuisine	22	Extraction	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
	Local ménage	19	Extraction	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
	WC du fo<LOD	18	Extraction	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
	Bureau / salle de réunion	0 – 12 (instable)	Insufflation	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
	Secrétariat	25	Insufflation	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
	Bureau direction	non accessible	Insufflation	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
	Bureau du maire	non accessible	Insufflation	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
	1er étage	WC gris	9	Extraction	Kimo à fil chaud + cône K35
Bureau vert – face escaliers		30	Insufflation	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
Bureau rose		30	Insufflation	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
Bureau jaune		non accessible	Insufflation	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19
Archives		non accessible	Insufflation	Kimo à fil chaud + cône K35	13/06/19

Taux de renouvellement de l'air

Le **taux de renouvellement de l'air** a ainsi pu être calculé dans la salle des mariages – à savoir l'espace qui nous intéresse particulièrement dans cette étude.

Tableau : Calcul du taux de renouvellement de l'air de la salle des mariages. Source : Cerema

	Débits soufflage (m ³ /h)
Bouche 1	74
Bouche 2	80
Bouche 3	63
Total	217

	Débits soufflage (m ³ /h)
Bouche 1	60
Bouche 2	52
Bouche 3	61
Total	173

Volume salle des mariages 441,3 m³

Volume parallélépipède 325,6

Largeur 7,2 m

Longueur 11,9 m

Hauteur 3,8 m

Volume prisme de base triangulaire (toiture) 115,7 m³

Base 7,2 m

Hauteur 2,7 m

Longueur 11,9 m

Débit total théorique CTA de consigne 300 m³/h

Taux RA ETE réel	0,49	vol/h	Taux RA HIVER réel	0,39	vol/h
Taux RA théorique	0,68	vol/h			

Ainsi, le taux de renouvellement de l'air réel en été (calculé sur les débits de soufflage) reste éloigné du taux de renouvellement théorique de commande de la CTA (72 % du taux de renouvellement de l'air théorique seulement), tandis que le taux de renouvellement de l'air réel de l'hiver est encore plus faible par rapport à ce taux de renouvellement d'air théorique (58 % du taux de renouvellement de l'air théorique).

Débits réglementaires

Enfin, au-delà de l'atteinte du débit/du taux de renouvellement d'air théorique et commandé par la CTA, il convient de **vérifier si les débits réglementaires sont bien atteints**.

La salle des mariages est soumise au **Règlement Sanitaire Départemental Type** pour le public accueilli (par exemple lors des cérémonies) ainsi que pour les élus (qui sont en mission mais non salariés), ainsi qu'au **Code du Travail** pour les agents présents lors de la tenue des conseils municipaux. Nous vérifierons l'atteinte des objectifs de ces 2 textes.

Cas 1 : cérémonie

Dimensionnement réalisé pour la présence du maire et de 30 citoyens venus assister à la cérémonie (hypothèse) => les 30 citoyens et le maire sont soumis au RSDT.

Salle de réunion => débit d'air neuf attendus de 18m³/h/personne = **558m³/h attendus**

Cas 2 : conseil municipal

Dimensionnement réalisé pour la présence de 19 élus (Le Maire, 4 adjoints, 14 conseillers) et de 5 agents municipaux (hypothèse) => les 19 élus sont soumis au RSDT tandis que les 5 agents sont soumis au Code du travail

Salle de réunion

=> débit d'air neuf attendus de $18\text{m}^3/\text{h}/\text{personne}$ pour les 19 élus (RSDT) = $342\text{m}^3/\text{h}$ attendus
=> débit d'air neuf attendus de $30\text{m}^3/\text{h}/\text{personne}$ pour les 5 agents (Code du Travail) = $150\text{m}^3/\text{h}$ attendus
=> débit total attendus de **$492\text{ m}^3/\text{h}$**

Le cas 1 est donc le cas dimensionnant et le débit réglementaire à atteindre par la CTA devrait donc être de $558\text{m}^3/\text{h}$ au lieu des $300\text{m}^3/\text{h}$ relevés sur place sur le panneau de contrôle. Ainsi, le débit de consigne de la CTA est largement inférieur à ce qui est attendu au titre de la réglementation notamment lors des cérémonies, mais aussi lors des conseils municipaux. Il est important de réviser cette consigne afin qu'elle soit revue lors de l'utilisation de la salle (le débit à atteindre ne doit pas être obligatoirement atteint en permanence, mais il doit être atteint lors de l'occupation de la salle).

Comportement des occupants

Dans l'extension centrale, les secrétaires de mairie subissent en hiver un courant d'air froid venant du linéaire entre le plancher bas et la paroi extérieure, ce qui engendre un inconfort thermique. La problématique a été relevée et l'entreprise cherche encore un moyen de limiter ces pertes thermiques. *A contrario*, en été, cette zone n'ayant pas suffisamment d'inertie, une surchauffe est constatée tous les ans durant tout l'été (température estivales supérieures à $30\text{ }^\circ\text{C}$ durant les 15 jours de la campagne, en journée).

Les bouches de ventilation ne sont pas bouchées et le personnel semble très respectueux des lieux. La grande porte d'accueil du public est régulièrement ouverte et refermée lors des heures d'accueil du public (tous les matins), mais reste fermée à clé en-dehors des heures d'ouverture (l'après-midi). Les fenêtres sont ouvertes le matin à l'arrivée du personnel en été afin de rafraîchir les lieux puis est fermée au *maximum*. Durant nos échanges avec le personnel, aucun comportement délétère pour la qualité de l'air intérieur n'a pas été mis à jour (pas de fumeur à proximité, pas d'utilisation d'aérosol, de bougie, etc.).

Conclusion du diagnostic bâtiment sur la mairie de Moncheaux

En résumé, ce diagnostic ne relève pas de source de pollution extérieure déterminante et peu de sources de polluants intérieurs. Néanmoins, il convient d'apporter une attention particulière aux produits d'entretien réellement utilisés (enlever les produits non utiles et limiter au *maximum* les mélanges), et un point d'attention est donné sur la présence de panneaux OSB à nu dans la circulation datant de 2014. La CTA en revanche ne fonctionnait pas de manière optimale lors de l'été 2019, mais elle fonctionnait lors des tests de l'hiver 2020. Il semble en revanche que le débit de consigne soit largement inférieur au débit réglementaire à atteindre lors des cérémonies et lors des conseils municipaux.

Annexe 2 – Diagnostic bâti du groupe scolaire

Introduction

Sur le second site étudié lors du projet EmiBio, à savoir celui d'un groupe scolaire situé dans le Pas-de-Calais (62) dans les Hauts-de-France, un diagnostic du bâti a également été réalisé, à l'instar de celui réalisé sur le premier site test. Ainsi, l'atelier 7/8 (interclasse instrumentée) a été plus particulièrement investigué, ainsi que les 2 salles de classes attenantes (salles 7 et 8 sur le plan). Le diagnostic bâtiment a été **réalisé le 22/01/2021** et a ensuite été complété par les mesures complémentaires ultérieures en **juillet 2021**.



Figure : Photos du groupe scolaire, vues extérieures. Gauche: Vue de face. Droite: Vue de l'arrière (atelier 7/8 en surplomb). Source : Cerema

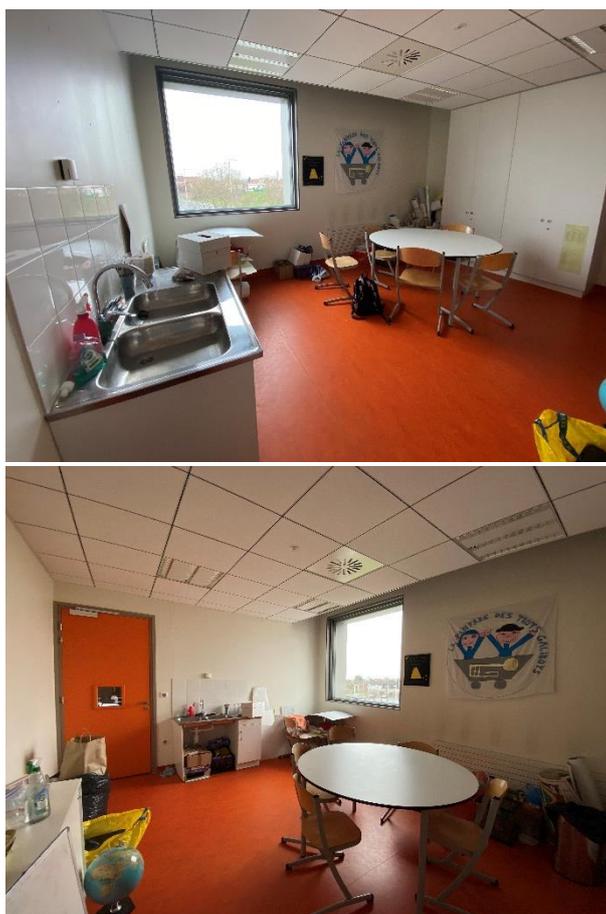


Figure : Photos de l'atelier 7/8 instrumenté. Gauche: Vue depuis la classe 8. Droite: Vue depuis la classe 7. Source : Cerema

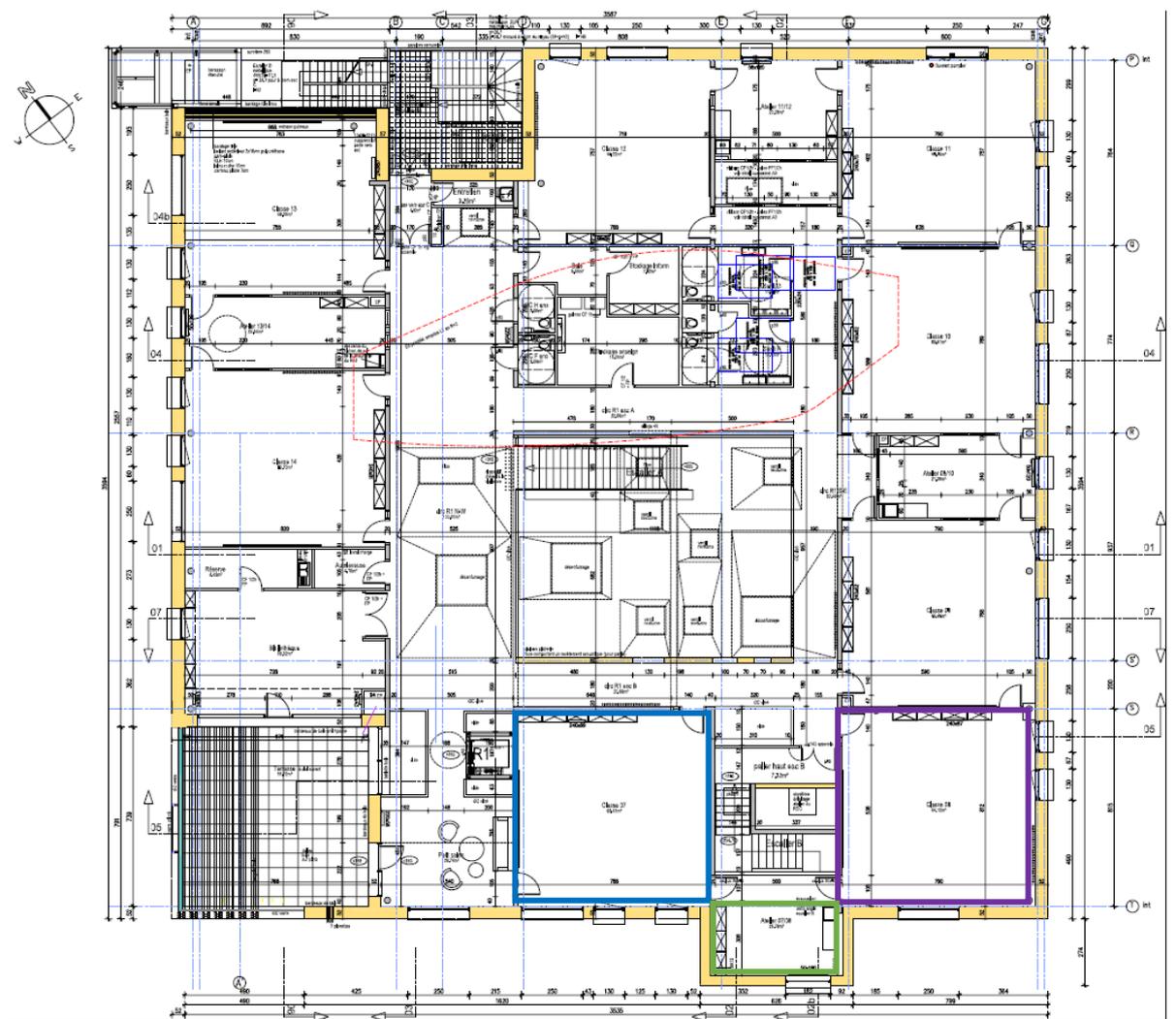


Figure : Plan du 1er étage du groupe scolaire. Bleu : classe 7. Vert : atelier 7/8. Violet : classe 8 Source : Cabinet d'architecte du groupe scolaire

Comme pour le premier site test, le diagnostic a intégré les points suivants :

- Analyse des sources de pollution potentielles extérieures
- Analyse des sources de pollution potentielles intérieures liées aux éléments suivants :
 - Matériaux de construction
 - Mobilier utilisé
 - Produits utilisés, en l'occurrence pour réaliser le ménage et fréquence d'utilisation
- Système en place, notamment la ventilation double flux de la salle des mariages
- Comportement des occupants : aération

Le site groupe scolaire a été livré en 2012 et est composé d'un bâtiment de 1882 m² répartis sur un rez-de-chaussée et 1 étage (2ème étage réduit, accessible par l'extérieur et consacré aux 2 CTA). Il s'agit d'un bâtiment passif (certifié Passiv'Haus) en structure béton poteaux poutres positionnés au sein du bâtiment, tandis que l'enveloppe extérieure est non porteuse et est montée en caissons en bois reconstitué de 360 mm remplis de ouate de cellulose (bardage bois extérieur et BA13 en intérieur) et de triple vitrage PVC / aluminium.

Le rez-de-chaussée comprend 6 salles de classe et 3 ateliers / interclasses, une halte-garderie avec 2 salles d'activité, une cour intérieure, un local pour les enseignants, des sanitaires, 2 locaux techniques (électrique et de stockage des produits d'entretien), 2 locaux réservés au stockage du matériel scolaire, et enfin 2 vestiaires pour les personnels d'entretien.

Le 1^{er} étage comprend quant à lui 8 salles de classe et 4 ateliers / interclasses, une bibliothèque, des sanitaires, un local de stockage du matériel scolaire, une salle pour le matériel informatique et un local de stockage des produits d'entretien.

Enfin, le 2^{ème} étage est en réalité un local technique uniquement accessible par l'extérieur au personnel autorisé et dédié aux 2 centrales de traitement d'air, à savoir une CTA double flux à roue GEA pour la partie école (salles de classes, etc.) et une double-flux à plaques dédiée aux sanitaires.

Ainsi, cet établissement peut accueillir au *maximum* environ 350 élèves (environ 25 élèves par classe). En réalité, le groupe scolaire accueille aujourd'hui environ 260 élèves et une vingtaine d'adultes (enseignants, personnel d'accompagnement), la capacité d'accueil ayant été légèrement surdimensionnée par rapport aux besoins actuels afin d'anticiper une potentielle augmentation des effectifs dans les années à venir.

Sources de pollution extérieures

Le groupe scolaire est construit dans une zone urbaine modérément dense. Construite sur un ancien quartier de zone d'aménagement prioritaire, les aménagements extérieurs prévus ne sont pas encore totalement terminés et sont (et seront) constitués de végétation à proximité immédiate (balade verte le long de l'école). Seul le parking permettant aux bus et aux voitures individuelles (nombreuses le matin et le soir) de se garer est à signaler comme source de pollution extérieure immédiate. Les alentours non immédiats sont essentiellement constitués de logements collectifs, pour partie très récents, les autres logements alentours – des logements sociaux datant des années 70 – étant pour partie prévus à la démolition / reconstruction. Se trouvent également aux alentours un EHPAD, un centre hospitalier et un bâtiment de Pôle emploi (parkings également). Les champs les plus proches sont à 300 m et une route départementale à 250 m (à vol d'oiseau). Les stations-services les plus proches sont à plus de 500 m.

Sources de pollution intérieures

Les sources de pollution classiques ont pu être déterminées, à savoir des sources potentielles en provenance des matériaux, d'autres en provenance du mobilier, ou des produits d'entretien puis de l'occupation. Ainsi, voici les sources identifiées qui seront illustrées par la suite :

o Matériaux :

- o L'isolation est réalisée par de la ouate de cellulose insufflée dans des caissons pré-fabriqués par une entreprise locale qui a développé ces caissons à façon, pour ce chantier. L'enveloppe extérieure n'est pas porteuse (structure porteuse constituée de poteaux-poutres à l'intérieur du bâtiment). NB : lors de la commande de caissons à l'identique à l'entreprise, l'équipe projet a constaté un tassement de plus de 30 cm de la ouate de cellulose dans le haut du caisson pouvant entraîner des ponts thermiques importants dans l'isolation du bâtiment. Ce constat a été remonté à l'entreprise. Après échange, il s'est avéré que la mise en œuvre sur chantier et celle réalisée par l'entreprise à la demande de l'équipe projet n'était pas identique pour l'insufflation de la ouate de cellulose (arrêt de l'insufflation par l'entreprise). Une vérification par caméra thermique a permis de vérifier qu'il ne semble pas y avoir de ponts thermiques via les caissons en l'insufflation sur site réel du groupe scolaire.
- o Le parement intérieur est un doublage de BA13cm recouvert par une peinture blanche mate (ponctuellement des plaques de plâtre, notamment sur les parois donnant sur l'escalier extérieur côté Nord).
- o Les fenêtres sont en triple-vitrage PVC / aluminium. Elles sont munies dans les salles de classe de protections extérieures, à savoir de stores à lamelles orientables (orientables automatiquement en fonction de la luminosité) ou de stores tissés. En intérieur, des rideaux opaques ont été ajoutés dans les salles de classe orientées Sud. Les portes sont en aluminium.
- o Au rez-de-chaussée, le sol est recouvert de revêtement souple plastifié coloré dans les salles de classes et d'activité et de carrelage dans la circulation, la cour intérieure, les sanitaires et les locaux techniques. A l'étage, le sol est recouvert de revêtement souple plastifié coloré, à l'exception des sanitaires et des locaux techniques (stockage des produits d'entretien par exemple) qui ont été carrelés.
- o Les planchers (intermédiaire et haut) sont des dalles béton (isolée pour la dalle du plancher haut) auxquelles sont rattachés les faux-plafonds. Une particularité est à signaler : les faux-plafonds ne rejoignent pas les parois verticales mais laisse un espace permettant à la fois d'accéder au réseau et aux grilles de ventilation situées dans le faux-plafonds, mais aussi d'améliorer la qualité acoustique de chacune des salles.



Figure : Salle de classe 8 avec ses murs peints en blanc, son sol recouvert de revêtement plastifié et le faux-plafonds désolidarisé des parois verticales (zoom à droite et vue sur la dalle et les gaines). Source : photos du Cerema



Figure : Circulations: à gauche, 1er étage au revêtement plastifié au sol - à droite: rez-de-chaussée avec sa cour intérieure carrelée. Source: photos du Cerema



Figure : Caissons pré-fabriqués commandés à l'identique par l'équipe projet à l'entreprise ayant fabriqué les caissons du groupe scolaire. A droite: le caisson debout. A droite: le caisson ouvert. Source : photo de l'Université de Picardie

- **Mobilier:** le mobilier des salles de classe est un mobilier classique en bois reconstitué et recouvert d'une protection plastifiée limitant les émissions en COV (tant que son intégralité est garantie).

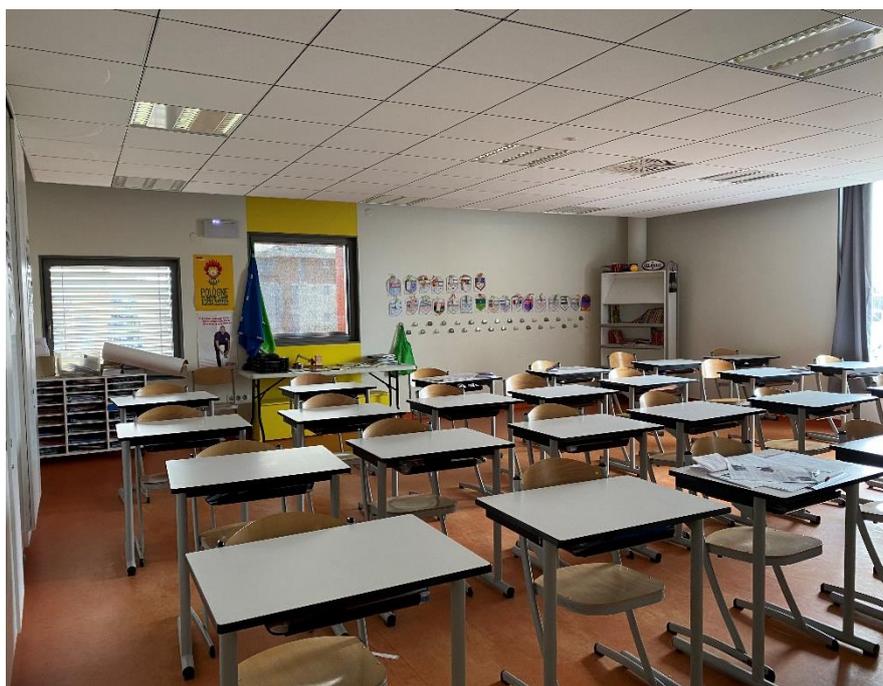


Figure : Salle de classe n°8 - classe de CE1D et mobilier utilisé. Source : photos du Cerema

- **Produits de nettoyage:** Le ménage est réalisé par une équipe de 2 personnes par étage en période scolaire, après la sortie de classe des enfants à partir de 16h (activités périscolaires en cours) employés par la mairie. Durant les congés scolaires, ce sont 2 personnes pour l'ensemble de l'établissement qui interviennent, sur l'ensemble de la journée. Le sol est lavé tous les jours dans l'ensemble de l'établissement (salles de classe et d'activité, circulations, sanitaires) par balayage avec microfibres et par nettoyage humide. Il n'a jamais été ciré depuis 2012. Les sanitaires sont également nettoyés et désinfectés tous les jours. De plus, en raison des mesures sanitaires, les tables et

bureaux, les poignées et porte-manteaux sont désinfectés tous les jours. Les fenêtres sont nettoyées pendant les congés scolaires, et de manière exceptionnelle et localisée en période scolaire en cas de salissure importante. Le nombre de produits utilisés reste limité et leur choix semble avoir été pensé afin de limiter les émissions de COV et l'impact sur l'environnement (cahier des charges de la mairie *a priori* écrit en ce sens).

- Les produits utilisés d'après les échanges informels avec le personnel d'entretien devraient être peu nombreux. Or, une très grande diversité de produits a été retrouvée dans chacun des deux locaux de stockage (plus encore au rez-de-chaussée où le stock des produits non entamés est remisé). Ils sont 11 à avoir été relevés au 1^{er} étage, plus 9 supplémentaires au rez-de-chaussée. Parmi ces produits, il est aisé d'en repérer les plus utilisés, via les chariots de nettoyage et le stock du rez-de-chaussée à savoir : des produits à base de bicarbonate de soude de marque Mariette (en poudre), du vinaigre blanc de marque Mariette (en pulvérisation), le nettoyant gel WC de marque Argos avec Ecolabel européen, le gel WC Senet, le détergent désinfectant sans alcool de marque DDSA (sans label, en pulvérisation), le détergent DTN pour le lavage des sols, le désodorisant citron vert (stock au rez-de-chaussée et dans l'un des chariots, attention car peu recommandé !), du chlore actif liquide (javel) en flacon, de la crème à récurer de marque ORLAV pour nettoyer les surfaces fragiles, la crème à main de marque Senet neutre, ou encore un désodorisant en pulvérisation de marque Febrèze (dans le chariot mais peu de stock attention, peu recommandé)
- D'autres semblent moins utilisés, sans pour autant pouvoir écarter un usage fréquent à certaines périodes de la semaine ou de l'année, comme en témoigne le stock important de ces produits, comme le produit insecticide pour insecte rampant (stock de plusieurs flocons d'aérosol au rez-de-chaussée), ou encore le nettoyant pour vitre Korum (avec Ecolabel Européen mais produit fréquemment utilisé par pulvérisation), un bidon de produit de marque Argos Excel pour désinfecter les éviers et un autre de même marque pour désinfecter les inox sous forme de pulvérisateur, un flacon pulvérisateur anti-bactérien désodorisant parfum menthe, ou encore un produit pour tapis nettoyant et détachant de marque Premiere Products en pulvérisateur (sans parfum mais aussi sans label).
- Attention, trop de produits différents sont utilisés ici (20 en tout relevés), dont plusieurs pour une même utilisation. De plus, trop peu d'entre eux possèdent un label et beaucoup d'entre eux sont proposés sous forme de pulvérisateur. Il est donc recommandé de faire du tri dans ces produits pour en limiter le nombre au *maximum* – cela évite les réactions entre produits chimiques différents et donc la création de produits secondaires chimiques pouvant être nocifs – de préférer les produits avec EcoLabel et de préférer l'usage de produits à appliquer sur chiffon plutôt qu'en pulvérisation dès que possible. En effet, les pulvérisations sont à limiter au *maximum* pour éviter qu'une grande partie du produit soit immédiatement émis dans l'air. La javel est à utiliser avec parcimonie, voire même à éviter. Les désodorisants sont à bannir car ils ne nettoient pas, émettent énormément de COV nocifs pour notre santé, et sont présentés sous forme de pulvérisateur (donc émis directement dans l'air). Enfin, les insecticides sont à utiliser avec parcimonie et en dernier recours.
- Le stockage de ces produits est réalisé dans une salle dédiée à chaque étage et fermée à clé, appelée « local entretien », ce qui est une très bonne pratique : en effet, cela évite l'accès à ces produits à des personnes non autorisées, en premier lieu les enfants, ou encore que des COV soient émis dans plusieurs salles différentes si une bouteille venait à être mal fermée. Au 1^{er} étage, une ventilation est assurée dans la salle de stockage des produits (extraction de 53 m³/h mesurée le 22/02/2021 dans le local entretien au 1^{er} étage). Néanmoins, au rez-de-chaussée, aucune bouche de ventilation n'est présente dans le local entretien – plus grande que celui du 1^{er} étage et où est situé le stock des produits non utilisés et où se trouve également le chauffe-eau, ce qui ne permet pas un renouvellement de l'air dans ce local. Le renouvellement de l'air ne peut se faire que via le détalonnement de la porte ou lors des ouvertures de porte, donc dans la circulation. Il est recommandé de prévoir une aspiration dans ce local, ou de changer de local de stockage des produits au profit d'un local fermé à clé et ventilé.



Figure : Illustration des produits d'entretien et de nettoyage utilisés – produits du 1er étage – local d'entretien. Source : photos du Cerema

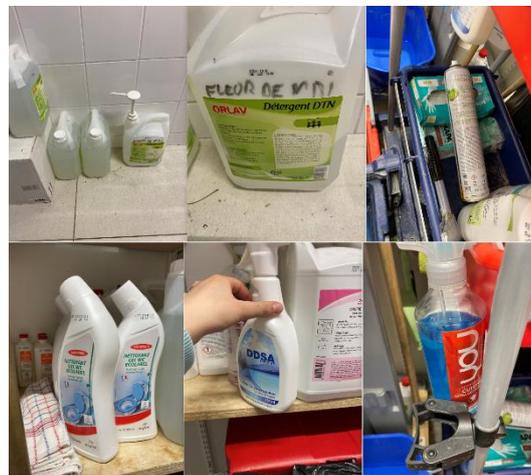


Figure : Illustration des produits d'entretien et de nettoyage supplémentaires trouvés au rez-de-chaussée – local d'entretien. Source : photos du Cerema



Figure : Illustrations du stockage des produits d'entretien et de nettoyage dans une salle dédiée, rangée, fermée à clés mais non ventilée au rez-de-chaussée. Source : photos du Cerema

- **Autre matériel** : rien à signaler durant le diagnostic, si ce n'est un grand stockage de matériel de pédagogie dans deux locaux enseignants dédiés (un au rez-de-chaussée et un autre à l'étage). Une extraction est présente dans le local du 1^{er} étage mais pas dans celui du rez-de-chaussée. La salle informatique, la salle électrique n'ont bien sûr pas pu être visitées, par sécurité.
- **Autre** : aucun dégât n'a été constaté dans le bâtiment (aucun problème d'humidité par exemple). En revanche, aucune extraction n'est présente dans le local entretien du rez-de-chaussée (signalé ci-dessus), ni dans le local enseignant du rez-de-chaussée où sont stockées de nombreuses fournitures dont certaines en plastique. Il est donc recommandé de faire installer une extraction dans chacun de ces 2 espaces dès que possible (aucune fenêtre présente donc aucune aération possible mise à part l'ouverture de la porte ou le détalonnement de la porte).

Système de ventilation et entretien

Le système de ventilation du groupe scolaire est constitué de 2 centrales de traitement d'air (CTA) doubles flux différents dont les réseaux de gaines sont en tôle galvanisée (isolées hors local chauffé). Une première CTA – la plus grande d'entre elle, est dédiée au renouvellement de l'air des salles de classes et ateliers, tandis que l'autre est dédiée au renouvellement de l'air des sanitaires et des locaux techniques et du personnel. Ces 2 CTA datent de la construction du bâtiment (2012) et sont entretenues par contrat avec une entreprise qui a un contrat de performance énergétique avec la mairie gérant le groupe scolaire. L'entreprise mandatée pour l'entretien assure donc un suivi très régulier des systèmes de chauffage et de ventilation afin d'optimiser leur gestion énergétique. En revanche, la QAI ne fait pas partie des objectifs de ce contrat.

L'entretien des CTA est donc réalisé par cette entreprise. Néanmoins, cela n'intègre pas le nettoyage des bouches elles-mêmes, donc cela devrait être fait en interne. L'entretien annuel prévu intègre le changement des filtres 2 à 3 fois par an et une vérification mensuelle de l'état de ces filtres. Une fois par an en entretien annuel, les filtres sont remplacés, les CTA nettoyées avec désinfection complète de chacune des 2 CTA et des filtres (obligatoire depuis fin 2019 avec la crise sanitaire). Concernant les gaines, rien n'est prévu au contrat. La mairie peut demander un nettoyage en plus hors contrat, mais cela n'a pas encore été fait à ce jour sur ce bâtiment. Or, un nettoyage des gaines est à réaliser idéalement tous les 2 à 3 ans, 10 ans étant un délai raisonnable et acceptable (étant donné le coût que cela représente et pour limiter l'usure des gaines). Il est donc recommandé de réaliser ce nettoyage dès que possible, en priorité sur le réseau de soufflage.

CTA principale desservant les salles de classe

La prise d'air neuf de cette CTA est située en toiture (second étage dédié aux locaux techniques) tout comme le rejet d'air vicié, les grilles étant situées sur des côtés opposés du local dédié aux 2 CTA afin d'éviter/limiter une reprise de l'air vicié par les grilles de prise d'air neuf. La distance idéale recommandée de 8 m entre prise d'air et rejet n'a pas pu être respectée par la configuration de ce local, mais leur position sur des faces opposées est néanmoins satisfaisante.

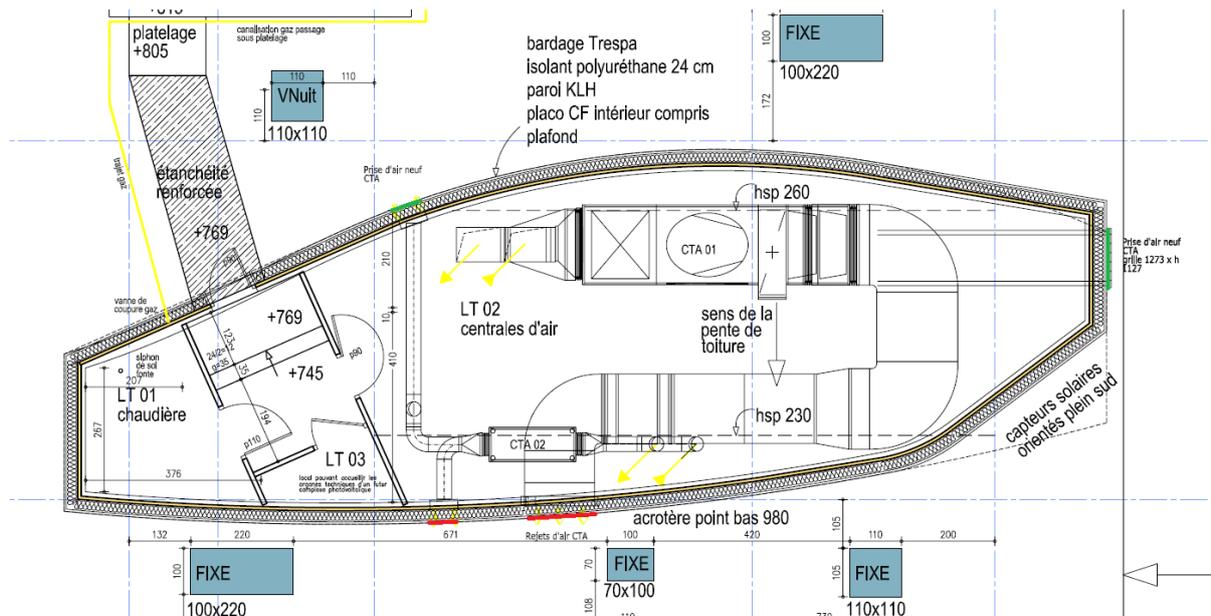


Figure : Plan du 2ème étage consacré au (magnifique) local CTA et chaudière positionnant les prises d'air neuf (vert) et les rejets CTA (rouge).
Source : plan du cabinet d'architecte



Figure : Local des CTA au 2ème étage du groupe scolaire. A gauche: CTA principale, à droite: CTA secondaire. Source: photo Cerema

Le renouvellement de l'air de cette CTA dans les salles de classe les ateliers ou les salles d'activité (garderie, bibliothèque, salle des professeurs) n'est pas assuré par balayage car l'extraction de l'air et le soufflage de l'air sont situés tous deux dans chacune des salles desservies : le soufflage est assuré par les grilles situées sur le faux plafond, tandis que l'aspiration est réalisée par la grande grille située dans le faux-plafond. Ce positionnement permet de limiter de manière satisfaisante le court-circuit des flux (le soufflage prélevé directement par l'aspiration) sans pour autant pouvoir garantir qu'il soit nul. Cet aspect n'a pas pu être vérifié lors du diagnostic. De plus, les grilles d'aspiration situées dans le faux-plafond n'ont pas pu être atteintes lors du diagnostic (risque de chute et grille inaccessible sans démonter en grande partie le faux-plafond). Seuls les débits de soufflage ont pu être mesurés pour cette CTA par échantillonnage lors de la première campagne (voir ci-dessous), de manière plus exhaustive lors de la seconde.



Figure : CTA principal: à gauche réseau de gaines et grille de reprise d'air vicié, à droite bouche de soufflage dans une salle de classe. Source: photo Cerema

Cette CTA tout air à débit variable (utilisée en débit fixe) sans recyclage est de marque GEA CAIR+SX, pour un débit de soufflage maximal théorique (débit nominal à plus ou moins 10 %) de 9620 m³/h. D'après l'entreprise d'exploitation / maintenance, au 04/02/2021, le débit était fixe à 26 Hz. Le débit maximal théorique de reprise est 9620 m³/h également. D'après l'entreprise, au 04/02/2021, le débit était fixe à 28 Hz. Or, les débits réels ont été bridés (donc diminués) car il y avait une problématique acoustique (bruit dans les salles de classe). Il n'y a pas eu d'étude acoustique. La CTA est équipée d'un filtre de reprise G4 à poche et d'un filtre de soufflage F7 à poche. De plus, une roue de récupération de chaleur assure le rôle d'échangeur thermique. Enfin, elle est équipée d'une batterie chaude de pré-chauffage, mais pas d'un humidificateur. Il est à noter que le récupérateur à roue entraîne inévitablement un petit mélange entre l'air vicié et l'air neuf, bien que minime *a priori*.

D'autres éléments techniques peuvent être portés à connaissance :

- Puissance de la CTA principale : 120 kW puissance de récupération pour une puissance électrique totale de 7kW
- Puissance nominale de la CTA: 4kW en soufflage et 3kW en récupération
- Rendement théorique de 90 % et température admissible de 80 °C *maximum*
- Vitesse nominale soufflage: 1430 tours/min
- Vitesse nominale extraction : 950 tour/min

Le débit est constant à l'usage – même si la CTA peut être utilisée en débit variable, il n'y a pas de modulation sur le CO₂. Le débit réel va toutefois varier un peu en fonction de la température car il est géré par automate. En effet, le démarrage, l'arrêt et le débit d'air de la CTA (pour les volets air neuf et de reprise) sont gérés par l'automate pour les augmenter de plus ou moins 10 % s'il fait froid/chaud, donc pour activer ou non la batterie chaude. Ainsi, pour un même débit fixé, il peut varier de plus ou moins 10 %. L'automate est calé en fonction de la température extérieure pour avoir 20 °C ambiant en jouant sur la batterie d'air neuf. Il n'y a pas ici de préoccupation sur la QAI.

Cette CTA fonctionne à 50 % de sa capacité en soufflage et à 60 % de sa capacité en extraction. Il n'y a pas de réduit de nuit ni durant les vacances scolaires.

CTA secondaire desservant les sanitaires et locaux techniques

Cette seconde CTA assure un renouvellement de l'air par balayage, les reprises d'air étant situées dans les sanitaires et locaux techniques, tandis que le soufflage de l'air est situé dans les circulations.

Les débits en soufflage et en extraction ont été intégralement mesurés lors du diagnostic du 22 et 23 février 2021.



Figure : CTA secondaire: à gauche bouche d'extraction et à droite bouche de soufflage. Source: photo Cerema

Cette CTA secondaire tout air à débit variable (utilisée en débit fixe) sans recyclage est de marque GEA Campos. Elle offre des débits théoriques en soufflage et en reprise de 930m³/h chacun. La CTA est équipée de filtres de reprise de taille 287x592x380 et de type M6 à poche, tandis que les filtres de soufflage sont de même taille mais de type F7 à poches. L'échangeur est ici un échangeur à plaques. Elle est également équipée d'une batterie chaude de pré-chauffage, mais pas d'un humidificateur. D'autres éléments techniques peuvent être portés à connaissance :

- Vitesse nominale de soufflage: 2076 tours/min
- Vitesse nominale de reprise: 2140 tour/min
- Puissance électrique totale de 1,4 kW

Cette CTA est utilisée à pleine puissance. Il n'y a pas de réduit de nuit ni durant les vacances scolaires.

Débits mesurés

Des mesures ont été réalisées les **22 et 23 février 2021** sur chacune des bouches (reprise et soufflage) des 2 CTA. Les mesures en reprise et en soufflage ont été exhaustives pour la CTA sanitaires. En revanche, étant donnée la position des grilles de reprise de la CTA principale (en faux-plafond, hors d'atteinte), les débits de reprise n'ont pas pu être mesurés sur cette CTA. De plus, étant donnée la taille des bouches dans les salles de classe et d'activité (hors atelier), il a fallu adapter le matériel disponible. En effet, les bouches d'une dimension de 56 cm de diamètre sont plus grandes que tout cône au Cerema (au moment des diagnostics). Il a donc fallu adapter manuellement le matériel utilisé par le Cerema en obligeant le flux d'air à passer par le cône afin d'en mesurer le débit correctement. Cette tâche étant longue et laborieuse, ces mesures ont été réalisées dans les salles de classe et d'activité par échantillonnage lors de la première campagne, et en priorité sur les salles de classe 7 et 8 du 1^{er} étage, à savoir les 2 salles adjacentes à l'atelier 7/8 instrumenté ici.

Ainsi, seuls les débits des salles de classe suivantes et des ateliers suivants ont été mesurés :

- Au rez-de-chaussée: classes 1 et 2 + atelier 1/2
- Au 1er étage: classes 7 et 8 + atelier 7/8
- Au 1er étage: classes 13 et 14 + atelier 13/14

Ainsi, les débits de 6 classes sur 14 ont été mesurés, soit sur plus de 40 % des classes.

Les débits des grandes bouches ont été mesurés avec le cône K75 + KIMO + fil chaud, tandis que les débits des bouches d'extraction de la CTA sanitaire ont été mesurés avec le cône K35 + KIMO + fil chaud.

Débits mesurés – campagne n°1 de février 2021 :

Tableau : débits mesurés en février 2021 sur le réseau de la CTA principale. Source: Cerema

Réseau CTA n°1 - salles de classe et atelier/inter-classe

Mesures réalisées avec le KIMO+cône K75

	Salle concernée	Débit soufflage (m ³ /h)	Débit aspiration (m ³ /h)	Occupation réelle au 22/02/2021	Remarque	Date mesure
1er étage (sur 8 salles de classe + 4 ateliers)	Salle de classe 07 CM2-D	220	Non mesuré	1 maîtresse + 26 élèves		22/02/2021
	Atelier 07/08	137	Non mesuré			22/02/2021
	Salle de classe 08 CM2-R	117	Non mesuré	1 maître + 24 élèves		22/02/2021
	Salle de classe 14 CE2-V	60	Non mesuré	1 maîtresse + 28 élèves		23/02/2021
	Atelier 13/14	170	Non mesuré			23/02/2021
	Salle de classe 13 CE1-D	210	Non mesuré	1 maître + 20 élèves		23/02/2021
RDC (sur 6 salles de classe + 3	Salle de réunion 01 / future salle de classe	133	Non mesuré			23/02/2021
	Atelier 01/02	189	Non mesuré		2 bouches	23/02/2021
	Salle de classe 02 CP-B	190	Non mesuré	1 maîtresse + 23 élèves		23/02/2021
	TOTAL	1426				
	TOTAL évalué sur 14 salles de classe + 7 ateliers + bibliothèque + salle des professeurs + 2 salles périscolaires +	4120				

Le débit de soufflage total mesuré sur les 6 salles de classe et les 3 ateliers est de 1426 m³/h. En extrapolant par rapport au nombre de salles et d'ateliers – les salles étant de surface comparables – et en ajoutant la bibliothèque, les 2 salles périscolaires, la salle de Direction et la salle des professeurs, le débit total extrapolé mesuré serait de 4120 m³/h environ.

Il est à noter les points suivants :

- Le débit total extrapolé est approximatif et est une valeur fortement estimée qui doit être considérée comme un ordre de grandeur.
- Il existe une forte disparité entre les débits mesurés, le plus faible étant de 60 m³/h (salle de classe 14 de 60 m² environ) tandis que le plus élevé étant de 220 m³/h (salle de classe 7 de 63m² environ), soit un facteur de 3,7 pour des classes de surface similaire. **Un équilibrage du réseau est nécessaire** et cette information a été remontée à l'exploitant par téléphone.
- Le débit théorique maximal est de 9620 m³/h, soit un facteur de 2,55 entre le débit réel extrapolé et le débit théorique maximal. **Ainsi, le débit réel extrapolé n'est que de 43 % à peine du débit théorique total aux 22 et 23 février 2021. Rappelons que cette CTA devrait fonctionner à 50 % de son débit théorique maximal en soufflage plus ou moins 10 % d'après l'exploitant.** Nous sommes donc sur le débit minimal (période de vacances scolaires mais *a priori* aucun réduit appliqué à cette période).

Tableau : débits mesurés en février 2021 sur le réseau de la CTA secondaire. Source: Cerema

Réseau CTA n°2 - sanitaires

Mesures réalisées avec le KIMO+cône K35

	Salle concernée	Débit soufflage (m ³ /h)	Débit aspiration (m ³ /h)	Remarque	Date mesure
1er étage	Sanitaire Femme individuel	NC	15		22/02/2021
	Sanitaire Homme individuel	NC	56		22/02/2021
	Sanitaires Femme collectif	NC	129	2 bouches	22/02/2021
	Sanitaires Homme collectif	NC	99	2 bouches dont 1 HS	22/02/2021
	Salle informatique	NC	Non mesuré (fermée)		22/02/2021
	Local enseignant / débarras	NC	124		23/02/2021
	Local agents de services (stockage outils de nettoyage)	NC	53		22/02/2021
	Petit salon / Couloir à côté de la salle 7	56	34	2 bouches, 1 en soufflage et l'autre en aspiration (pas d'autres trouvées en soufflage au R+1) // mesures avec le cône K75	22/02/2021
RDC	Agents de service Homme (débarras)	NC	45		23/02/2021
	Agents de service Femme (vestiaire)	NC	48		23/02/2021
	Local agents de services (stockage produits de nettoyage + chauffe-eau)	pas de ventilation dans ces 2 espaces			/
	Local enseignant / débarras (stockage fournitures)	pas de ventilation dans ces 2 espaces			/
	Sanitaires garderies CP/CE1/CE2	NC	49		23/02/2021
	Sanitaires garderies CM1/CM2	NC	47		23/02/2021
	Sanitaires collectifs (de gauche à droite et de l'entrée filles vers le fond puis vers l'entrée garçons)	NC	6		23/02/2021
		NC	13		23/02/2021
		NC	42		23/02/2021
		NC	61		23/02/2021
		NC	24		23/02/2021
		NC	34		23/02/2021
		NC	20		23/02/2021
		NC	58		23/02/2021
		NC	60		23/02/2021
		NC	49		23/02/2021
		NC	10		23/02/2021
NC	58		23/02/2021		
NC	42		23/02/2021		
			A part		
			Située à l'entrée filles // mesures avec le cône K75	23/02/2021	
	49	NC			
TOTAL	105	1176	m³/h		

Lors du diagnostic (1^{ère} et 2^{ème} campagne), très peu de bouches de soufflage ont pu être détectées visuellement. Or, le débit total de soufflage mesuré lors du diagnostic de février n'était que de 105 m³/h pour la CTA secondaire, tandis que le débit total d'extraction mesuré était de 1176 m³/h. Ainsi, l'hypothèse la plus probable est que toutes les bouches de soufflage ne soient pas toutes visibles car le déséquilibre serait bien trop grand pour être physiquement possible dans un tel établissement (facteur 10 environ).

Le débit d'extraction mesuré en février était de 1176 m³/h tandis que le débit maximal théorique en extraction et en soufflage est de 930 m³/h. Ainsi, la CTA fonctionnerait au-delà de ses capacités, à savoir à 126 % de ses capacités théoriques en extraction. Il est donc important de vérifier le réglage de celle-ci. Ce résultat reste néanmoins surprenant et est resté comparable lors du second diagnostic en été présenté ci-dessous.

A noter également un fort déséquilibre de débit aux bouches. Il serait donc intéressant, voire essentiel de rééquilibrer les réseaux (CTA n°1 et n°2), et d'augmenter les débits aux bouches de la CTA n°1.

Débits mesurés – campagne n°2 de juillet 2021 :

Tableau : débits mesurés en juillet 2021 sur le réseau de la CTA principale. Source: Cerema

Réseau CTA n°1 - salles de classe et atelier/inter-classe Mesures réalisées avec le KIMO+cône K75+carton

	Salle concernée	Débit soufflage (m³/h)	Débit retenu (m³/h)	Heure	Débit aspiration (m³/h)	Occupation réelle au 12/07/2021	Remarque	Date mesure	
1er étage (sur 8 salles de classe + 4 ateliers)	Salle de classe 07 CM2-D	193	193	10h00	Non mesuré	1 maîtresse + 26 élèves		12/07/2021	
	Atelier 07/08	150		10h05	Non mesuré			12/07/2021	
	Atelier 07/08	145		10h35	Non mesuré			12/07/2021	
	Atelier 07/08	120		11h13	Non mesuré			12/07/2021	
	Atelier 07/08	145		12h45	Non mesuré			12/07/2021	
	Atelier 07/08	170		10h15	Non mesuré			16/07/2021	
	Atelier 07/08	160		19h25	Non mesuré			16/07/2021	
	Atelier 07/08	130	141	9h57	Non mesuré			17/07/2021	
	Atelier 07/08	126		11h48	Non mesuré			19/07/2021	
	Atelier 07/08	128		10h22	Non mesuré			20/07/2021	
	Atelier 07/08	150		19h35	Non mesuré			20/07/2021	
	Atelier 07/08	121		9h45	Non mesuré			22/07/2021	
	Atelier 07/08	155		10h07	Non mesuré			23/07/2021	
	Atelier 07/08	132		10h15	Non mesuré			26/07/2021	
	Salle de classe 08 CM2-R	122	122	10h41	Non mesuré	1 maître + 24 élèves (cf hiver)		12/07/2021	
	Salle de classe 09 CE2-H	290	290	10h45	Non mesuré	1 maîtresse + 28 élèves		12/07/2021	
	Atelier 09/10	135	135	10h48	Non mesuré			12/07/2021	
	Salle de classe 10 CM1-W	265	265	10h51	Non mesuré	1 maîtresse + 25 élèves	Instable: passé de 190 à 265m³/h en 30s	12/07/2021	
	Salle de classe 11 CM1-P	160	160	10h55	Non mesuré	?	Instable: passé de 25 à 160m³/h en 30s	12/07/2021	
	Atelier 11/12	32	32	10h57	Non mesuré			12/07/2021	
	Salle de classe 12 / salle de réunion / local enseignant	160	160	11h00	Non mesuré	NC	Instable: passé de 40 à 160m³/h en 30s	12/07/2021	
	Salle de classe 13 CE1-D	NC	170	NC	Non mesuré	1 maître + 20 élèves (cf hiver)	Fermée à clés	12/07/2021	
	Atelier 13/14	NC	103	NC	Non mesuré		Fermé à clés	12/07/2021	
	Salle de classe 14 CE2-V	NC	170	NC	Non mesuré	1 maîtresse + 28 élèves (cf hiver)	Fermée à clés	12/07/2021	
	Bibliothèque	50	50	13h11	Non mesuré		Bouche en longueur. Instable: forte variation du débit entre 35 et 60m³/h	12/07/2021	
	RDC (sur 6 salles de classe + 3 ateliers)	Salle de réunion 01 / future salle de classe	119	119	11h37	Non mesuré			12/07/2021
		Atelier 01/02	Non mesuré	103	NC	Non mesuré		2 bouches / fermé à clés	12/07/2021
		Salle de classe 02 CP-B	170	170	13h00	Non mesuré	1 animateur du centre aéré + 23 élèves en périscolaire		12/07/2021
Direction		43	43	11h45	27	1 bureau	extraction au centre et soufflage proche de la fenêtre	12/07/2021	
Salle enseignants / bureau		170	170	11h49	Non mesuré			12/07/2021	
Salle de classe 03 CP-F		245	245	12h58	Non mesuré	1 animateur du centre aéré + 23 élèves en périscolaire		12/07/2021	
Atelier 03/04		Non mesuré	103	NC	Non mesuré		Fermé à clés	12/07/2021	
Salle de classe 04 CP/CE1-S		106	106	11h53	Non mesuré	1 animateur du centre aéré + 24 élèves en périscolaire		12/07/2021	
Salle de classe 05 CE1-C		32	32	11h55	Non mesuré			12/07/2021	
Atelier 05/06		Non mesuré	103	NC	Non mesuré		Fermé à clés	12/07/2021	
Salle de classe 06 RASED / ateliers		180	180	11h58	Non mesuré			12/07/2021	
Garderie 1 / salle d'activité 2		200	200	12h03	Non mesuré			12/07/2021	
Hall périscolaire / espace polyvalent		65	65	12h06	Non mesuré			12/07/2021	
Garderie 2 / salle d'activité 1		92	92	12h08	Non mesuré			12/07/2021	
Débit total mesuré et extrapolé		3722 m³/h							

En vert dans ce tableau sont représentés les débits calculés. Voici les hypothèses prises :

- le débit pris en compte dans l'atelier 7/8 est le débit moyen des 13 points de mesure,
- les 3 débits des ateliers manquants (salles fermées à clef) ont été calculés comme étant les débits moyennés des 3 points de mesure réalisés dans les 3 autres ateliers accessibles,
- les débits des salles de classe 13 et 14 ont été calculés comme étant les débits moyennés des 12 points de mesure réalisés dans les autres salles de classe.

Différentes mesures ont été réalisées dans l'atelier 7/8, local où ont été réalisées les mesures en émissions et de polluants de l'air. Ces différentes mesures ont permis de mettre en évidence une variation importante du débit de soufflage :

Tableau : débits mesurés dans l'atelier 7/8 durant la campagne de juillet 2021. Source : Cerema

Atelier 7/8 - campagne été

Heure	Débit soufflage (m³/h)	Ecart moyen (m3/h)	% écart avec débit moyen	Débit moyen (m3/h)
12/07/2021 10:05	150	4,5	3,2	141
12/07/2021 10:35	145	2,0	1,4	
12/07/2021 11:13	120	10,5	7,4	
12/07/2021 12:45	145	2,0	1,4	
16/07/2021 10:15	170	14,5	10,3	
16/07/2021 19:25	160	9,5	6,8	
17/07/2021 09:57	130	5,5	3,9	
19/07/2021 11:48	126	7,5	5,3	
20/07/2021 10:22	128	6,5	4,6	
20/07/2021 19:35	150	4,5	3,2	
22/07/2021 09:45	121	10,0	7,1	
23/07/2021 10:07	155	7,0	5,0	
26/07/2021 10:15	132	4,5	3,2	

Le débit moyen retenu est de 141 m³/h, mais il est précisé que celui-ci a varié entre le 12/07 et le 26/07, de 126 m³/h à 170 m³/h, soit une variation pouvant aller jusqu'à plus de 10 % (et non pas de +/-5 % comme attendu) par rapport au débit moyen relevé durant cette période. Cet écart constaté dans ce local est également à attendre dans les autres locaux du groupe scolaire. C'est le débit moyen qui a été retenu dans l'évaluation du débit total repris dans le [tableau 3], évalué à 3722 m³/h en soufflage. Par rapport au débit évalué en février 2022 (4120 m³/h), il existe un écart de près de 11 %, le débit estival étant plus faible que le débit évalué en hiver. Cet écart peut s'expliquer à la fois par le calcul en hiver très fortement estimé (le nombre de points de mesures était plus faible qu'en juillet 2021) mais aussi par la variation des débits constatée et démontrée sur l'atelier 7/8. Les débits mesurés restaient toutefois comparables entre les campagnes de février et de juillet, pour ceux ayant pu être mesurés aux deux saisons.

Tableau : débits mesurés en juillet 2021 sur le réseau de la CTA secondaire. Source: Cerema

Réseau CTA n°2 - sanitaires		Mesures réalisées avec le KIMOrcône K35					
Salle concernée	Débit soufflage (m ³ /h)	Heure	Débit aspiration (m ³ /h)	Remarque	Date mesure		
1er étage	Sanitaire Femme individuel	NC	14h01	19		12/07/2021	
	Sanitaire Homme individuel	NC	13h59	55		12/07/2021	
	Sanitaires Femme collectif	NC	14h01	124	2 bouches: gauche à l'entrée = 39m ³ /h / droite au fond = 85m ³ /h	12/07/2021	
	Sanitaires Homme collectif	NC	14h09	90	2 bouches dont 1 HS: gauche à l'entrée = 90m ³ /h / gauche au fond = 0m ³ /h	12/07/2021	
	Salle informatique	NC	NC	NC	Fermée à clés	12/07/2021	
	Local enseignant / débarras	NC	13h54	52		12/07/2021	
	Local agents de services (stockage outils de nettoyage)	NC	13h57	53	Proche escalier extérieur	12/07/2021	
	Petit salon / Couloir à côté de la salle 7	13	13h20	57	2 bouches, 1 en soufflage (gauche en regardant les bouches) et l'autre en aspiration (à	12/07/2021	
	Bibliothèque	NC	13h17	190	Bouche ronde	12/07/2021	
	Salle d'entretien / réserve / agent de service / autoclaveuse	NC	13h39	39	Bouche sale	12/07/2021	
RDC	Agents de service Homme (débarras)	NC	NC	Non mesuré	Fermé à clés	12/07/2021	
	Agents de service Femme (vestiaire)	NC	NC	Non mesuré	Fermé à clés	12/07/2021	
	Local agents de services (stockage produits de nettoyage + chauffe-eau)	Pas de ventilation dans ces 2 espaces				Fermé à clés	12/07/2021
	Local enseignant / débarras (stockage fournitures)	Pas de ventilation dans ces 2 espaces				Fermé à clés	12/07/2021
	Local électrique	NC	NC	Non mesuré	Fermé à clés	12/07/2021	
	Sanitaires garderies CP/CE1/CE2	NC	14h59	48		12/07/2021	
	Sanitaires garderies CM1/CM2	NC	15h00	42		12/07/2021	
	Sanitaires collectifs (de gauche à droite et de l'entrée filles vers le fond puis vers l'entrée garçons)	NC	Entre 14h40 et 14h55	4		12/07/2021	
		NC		13		12/07/2021	
		NC		40		12/07/2021	
		NC		62		12/07/2021	
		NC		22		12/07/2021	
		NC		31		12/07/2021	
		NC	Entre 14h30 et 14h40	23		12/07/2021	
				55		12/07/2021	
				61		12/07/2021	
				49		12/07/2021	
				16		12/07/2021	
				57		12/07/2021	
	NC		43		à part	12/07/2021	
45	14h55	NC	Située à l'entrée filles // mesures avec le cône K75		12/07/2021		
TOTAL	58	m ³ /h	1245	m ³ /h			
TOTAL estimé			1338	m ³ /h			

Les débits mesurés en juillet 2021 sont comparables à ceux de février 2021 mais avec un écart non négligeable. Le débit de soufflage n'est pas représentatif car les bouches n'ont pas pu être détectées, contrairement aux bouches d'aspiration. Le débit extrait estimé (deux salles fermées, les débits de février ont donc été repris) est alors de 1338 m³/h. L'écart constaté est de près de 14 % par rapport au débit total hivernal extrait.

Taux de renouvellement de l'air

Le taux de renouvellement de l'air n'a pas été calculé dans l'ensemble des salles, mais il a été appliqué sur l'atelier 7/8 et sur l'une des deux salles de classe attenantes, à savoir la salle n°8. Celle-ci a été choisie car son débit est très inférieur au débit théorique attendu (débit de dimensionnement de la CTA), fixé à 450m³/h dans chacune des salles de classe.

A noter qu'en fonction de l'occupation réelle des salles, il semble que les débits de soufflage des 2 garderies et de la salle de classe 05 soient beaucoup trop faibles. Un ré-équilibrage est donc indispensable ainsi qu'une augmentation des débits de soufflage de la CTA n°1.

- **Atelier 7/8**

Les débits mesurés dans l'atelier 7/8 était de 137 m³/h en hiver et de 141 m³/h en été. Le débit théorique attendu était de 225 m³/h dans cet espace. **Ainsi, les débits réels sont d'environ 60 % du débit théorique attendu dans cet espace.**

Les dimensions de l'atelier sont les suivantes :

- Largeur: 626 cm – 56x2 cm – 13x2 cm = 496 cm de mur à mur
- Profondeur: 308 cm + 107 cm = 415 cm de mur à mur
- Surface utile de 20.58 m²
- Hauteur (hors faux-plafond suspendu) : 360 cm

- Le volume est donc de 74 m³ environ

Le taux de renouvellement de l'air, qui correspond au volume d'air renouvelé par air, peut être calculé à partir du débit réel et du volume de la salle :

- Taux de renouvellement d'air réel en hiver 2021 : 1.85
- Taux de renouvellement d'air réel en été 2021 : 1.90
- Taux de renouvellement d'air théorique attendu : 3.04

- **Salle de classe n°8**

Le débit réel mesuré dans cette salle de classe était bas. Il était de 117 m³/h en hiver et de 122 m³/h en été tandis que le débit théorique attendu est de 450 m³/h. **Ainsi le débit réel atteignait environ 26 % en hiver et 27 % en été de ce débit théorique attendu.**

Les dimensions de cette salle sont les suivantes :

- Largeur : 790 cm
- Profondeur : 812 cm
- Hauteur : 360 cm
- Volume : 230.9 m³

Le taux de renouvellement d'air est donc calculé :

- Taux de renouvellement d'air réel en hiver 2021 de la salle 8 : 0.51
- Taux de renouvellement d'air réel en été 2021 de la salle 8 : 0.53
- Taux de renouvellement d'air théorique attendu de la salle 8 : 1.95

Ainsi, le taux de renouvellement de l'air de cette salle de classe est très bas, bien que celle-ci ne soit pas la plus défavorisée.

Débits réglementaires – salle n°8

Enfin, au-delà de l'atteinte du débit/du taux de renouvellement d'air théorique et commandé par la CTA n°1, il convient de **vérifier si les débits réglementaires sont bien atteints dans la salle de classe n°8.**

Les salles de classe sont soumises au **Règlement Sanitaire Départemental Type** pour le public accueilli (les élèves), ainsi qu'au **Code du Travail** pour les professeurs. Nous vérifierons l'atteinte des objectifs de ces 2 textes.

Le dimensionnement a été réalisé pour la présence d'un professeur et de 24 élèves, comme indiqué sur la porte de la salle. Pour une salle de classe, le débit d'air neuf attendu est de 15 m³/h/élève (RSDT – locaux d'enseignement de maternelle, primaire et 1^{er} cycle) et de 25 m³/h/professeur (Code du Travail) = **385 m³/h attendus**

Le débit théorique est donc correctement dimensionné. En revanche, les débits atteints en été et en hiver sont largement en-dessous du débit à atteindre dans les salles de classe. Pour un nombre d'élèves à peu près similaire dans chaque salle, le débit sanitaire à atteindre doit donc être de **385 m³/h, soit environ 85 % du débit théorique attendu (débit de dimensionnement). Il apparaît donc essentiel de faire fonctionner la CTA à 85 % de sa puissance. En effet, aucune des salles de classe n'atteint ce débit théorique de dimensionnement de la CTA.**

Comportement des occupants

Les bouches de ventilation ne sont pas bouchées et le personnel semble très respectueux des lieux. Les bouches sont propres et en bon état de fonctionnement et le groupe scolaire est récent. Les fenêtres peuvent être ouvertes par les professeurs durant les cours. Durant nos échanges avec le personnel d'entretien, aucun comportement délétère pour la qualité de l'air intérieur n'a pu être mis à jour (pas de fumeur à proximité, pas d'utilisation d'aérosol, de bougie, etc. autre que pour faire le ménage et signalé précédemment).

Conclusion du diagnostic bâtiment sur le groupe scolaire

En résumé, ce diagnostic ne relève pas de source de pollution extérieure déterminante et peu de sources de polluants intérieurs. Néanmoins, il convient d'apporter une attention particulière aux produits d'entretien réellement utilisés (enlever les produits non utiles et limiter au *maximum* les mélanges, limiter l'utilisation de pulvérisateur au profit de chiffons humides, limiter voire supprimer l'utilisation de javel et de désodorisants, etc.).

La CTA n°1, en revanche fonctionne à moins de 50 % de sa capacité maximale, ce qui amène à des débits très inférieurs aux débits attendus par la réglementation (RSDT et Code du Travail). L'approche purement énergétique semble être très défavorable à celle de la QAI. Il convient également de veiller à un bon équilibrage des débits car des débits très disparates ont pu être relevés sur place. La CTA n°2 devra également être vérifiée.

L'entretien des CTA est réalisé sous contrat avec une entreprise d'exploitation / maintenance régulièrement. Il est conseillé, en plus de cet entretien régulier, de faire réaliser tous les 5 ans un nettoyage des gaines, notamment des gaines de soufflage, afin d'assurer une bonne qualité de l'air entrant dans chacune des 2 CTA.

Annexe 3 – Reproduction parois dans le laboratoire LTI-UPJV Amiens

Reproduction de la paroi dans le laboratoire LTI-UPJV Amiens – Mur de Moncheaux Composition de la paroi

On trouve dans l'ordre, de l'intérieur vers l'extérieur (voir schéma ci-dessous):

	<i>Matériaux</i>
A	BA 18 standard
B	BA 18 standard
C	Laine de bois ISONAT FLEX 55 épaisseur 60 mm
D	Pare-vapeur (AEROVAP SD18)
E	Laine de bois ISONAT FLEX 55 épaisseur 120 mm
F	Tasseau épaisseur ≈ 40 mm (évite le contact de l'isolant avec la paroi extérieure)
G	Mur Briques

Commentaires :

En raison de la difficulté d'approvisionnement en plaques « Pregyplac » de la marque SINIAT de types différents et mises en œuvre sur le site de Moncheaux (livrables uniquement par palettes entières et avec des délais importants), les deux plaques de plâtre cartonné A et B ont été remplacées, pour les essais en laboratoire, par des plaques de même épaisseur de BA-18 standard.

La laine de bois en panneaux semi-rigides est en revanche de même type (même fabricant, même marque, mêmes caractéristiques) que celle mise en place sur site.

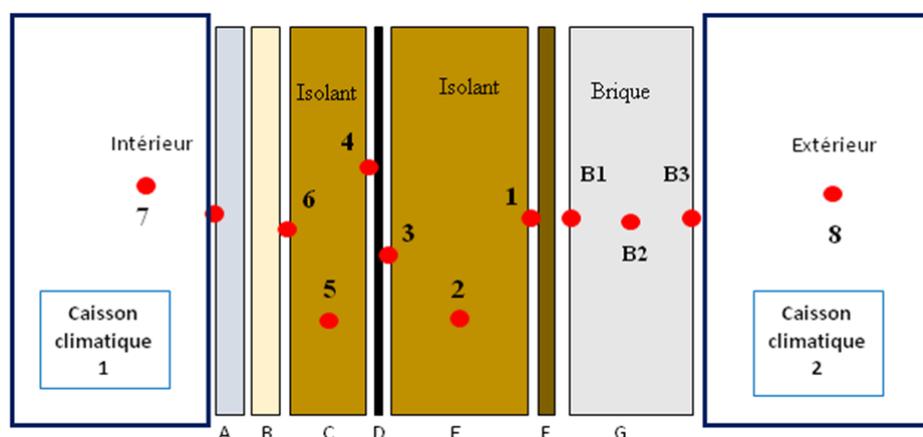


Figure : Position des capteurs - thermo-hygromètres. Source : Université d'Artois

Pour faciliter la compréhension, nous avons respecté la convention utilisée dans le mur réel (in-situ) par l'Université d'Artois.

Tableau : numérotation des capteurs dans le mur réel reproduit du site n°1. Source : Université de Picardie

Figure : Photos de la réalisation du doublage (en deux exemplaires). Source : Université de Picardie

Capteur 1 à 8	Numérotés selon le mur réel instrumenté par l'Université d'Artois
Capteur 6'si (n°12)	Température de la surface intérieure
B1, B2 et B3 (n°9,10,11)	Température dans la brique (G)

Face intérieure



Face intérieure avant pose isolant et placo

Capteur HMP 60

Pare-vapeur

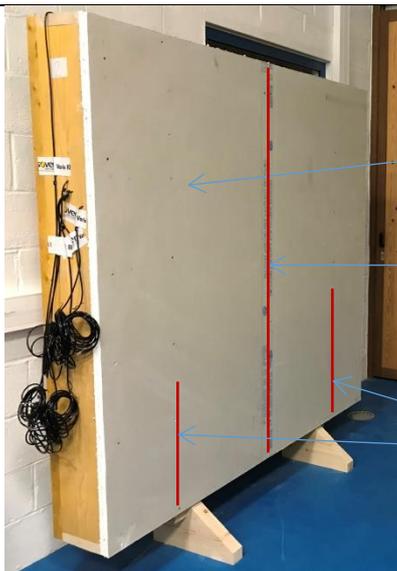
Montants métalliques
Pare-vapeur



Face intérieure avec isolant sans placo

Capteur HMP 60

Face isolant 60 mm
(avant pose du placo)



Face intérieure finie

2 épaisseurs de BA 18

Joint des plaques extérieures

Joint des plaques en sous-face

Face contre Mur en brique



Structure bois et pare-vapeur
avant pose isolant 120 mm

Laine de bois épaisseur
120 mm



2 tasseaux horizontaux
maintiennent la laine.

Une lame d'air d'environ 4/5 cm évite le
contact entre la brique et l'isolant.



Vue mur en briques avant pose
doublage.



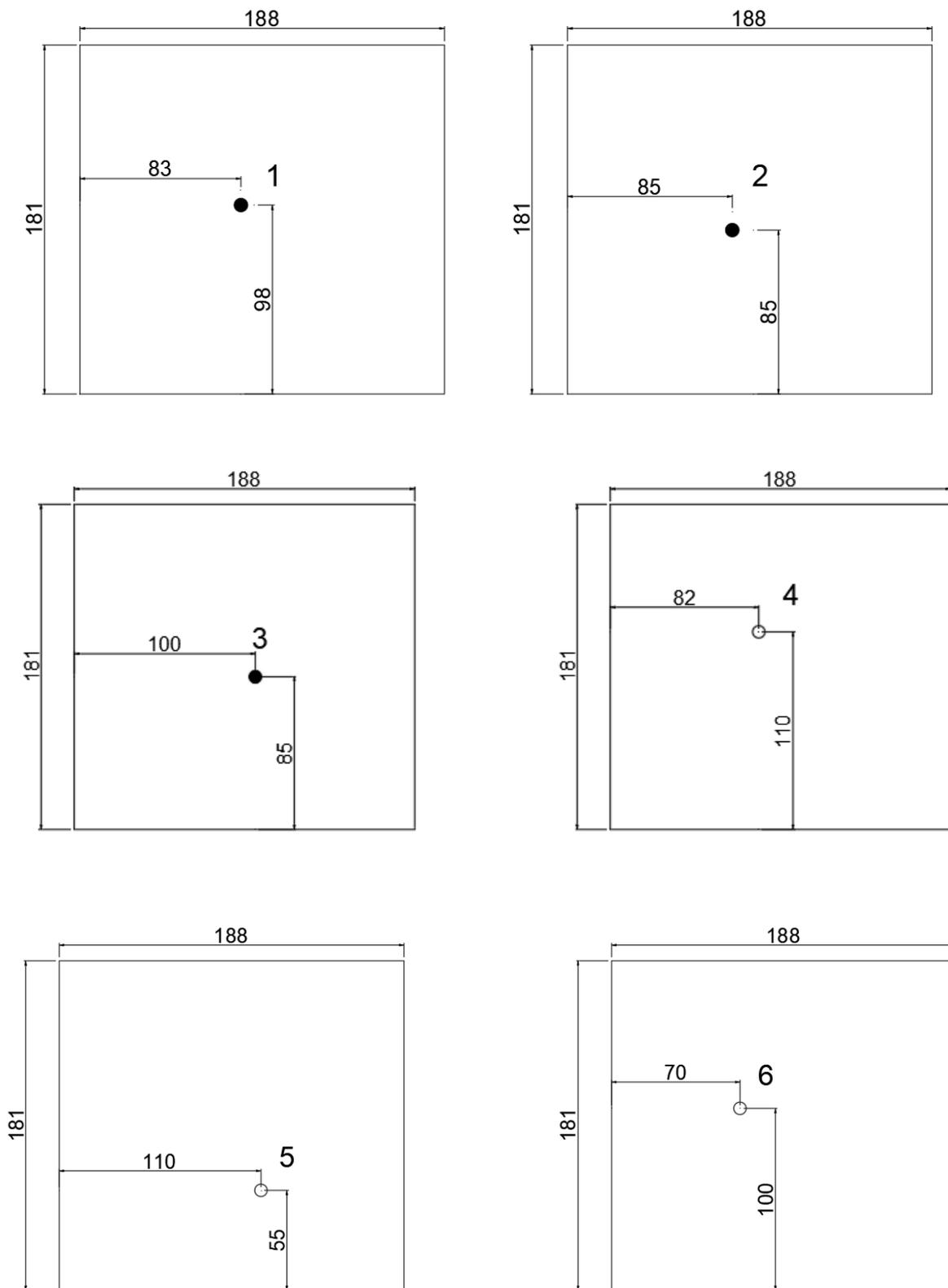


Figure : Repérage de la position des capteurs. Source : Université de Picardie

Résultats du Mur de la mairie de Moncheaux – Mur_M_norm

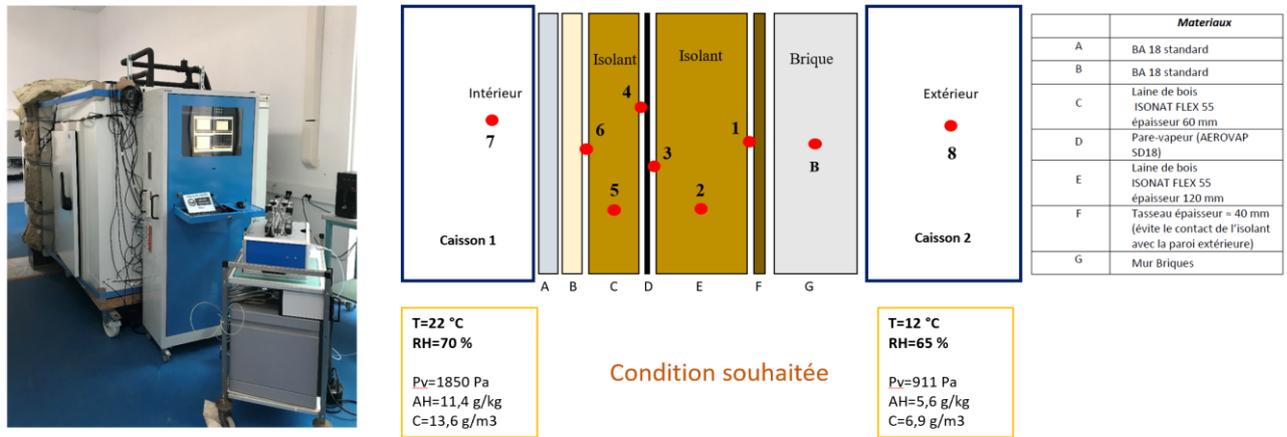


Figure : Positionnement des thermo-hygromètres et condition de test. Source : Université de Picardie

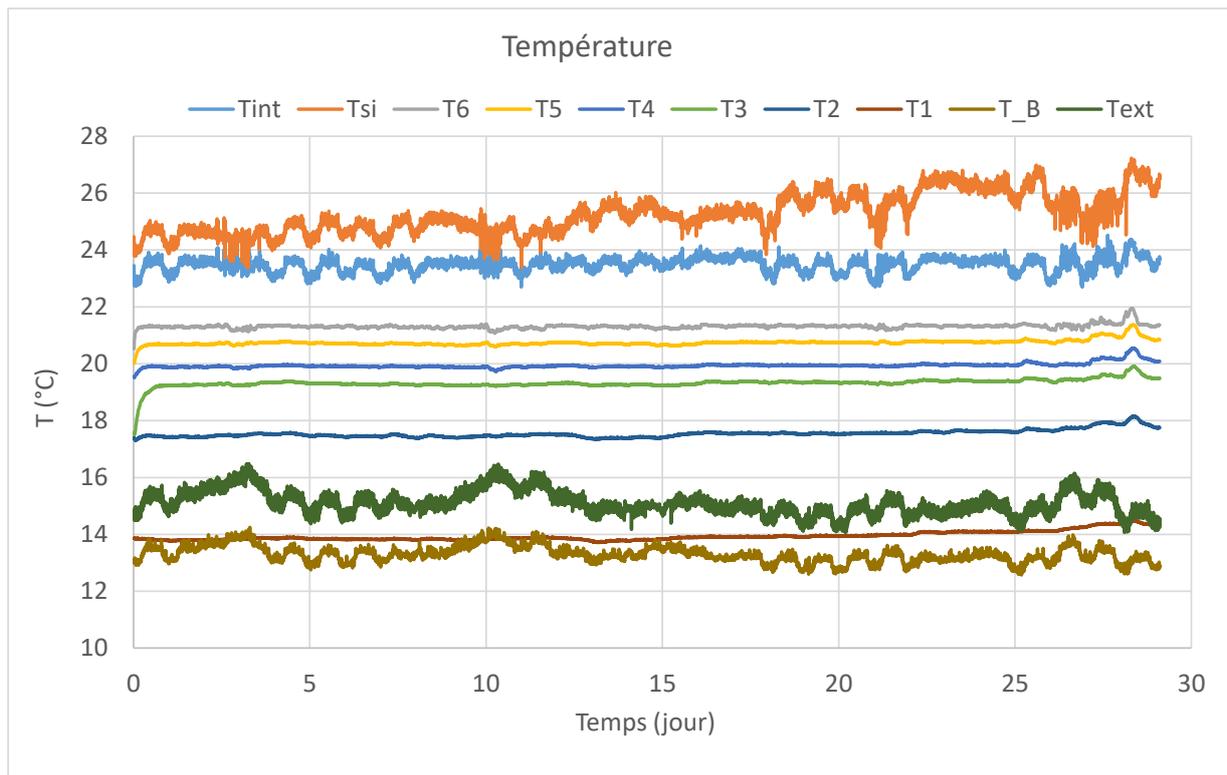


Figure : Température en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions normales. Source : Université de Picardie

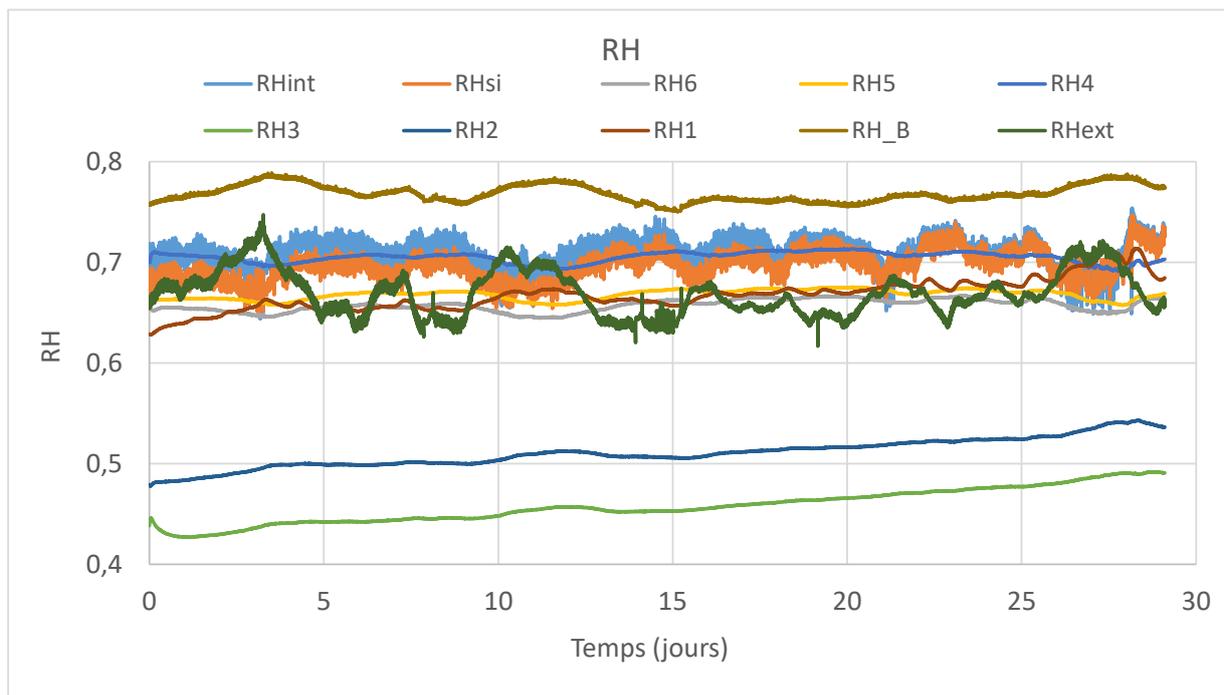


Figure : Humidité relative en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions normales. Source : Université de Picardie

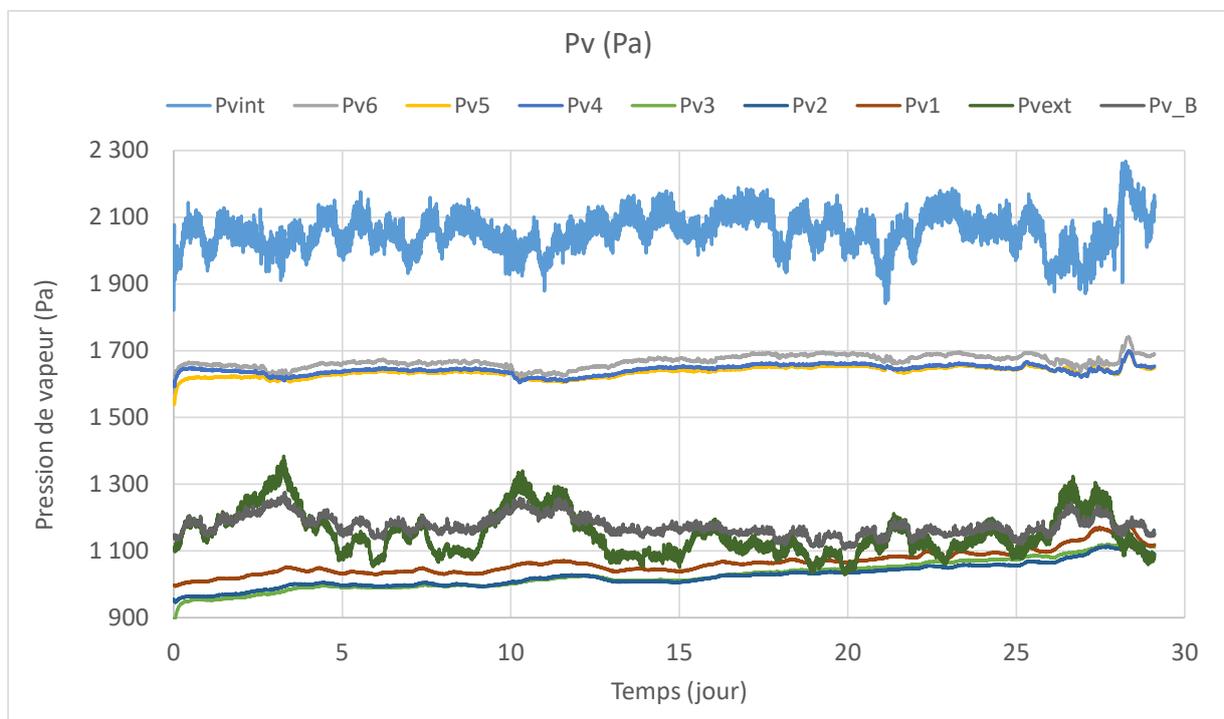


Figure : Pression de vapeur d'eau en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions normales. Source : Université de Picardie

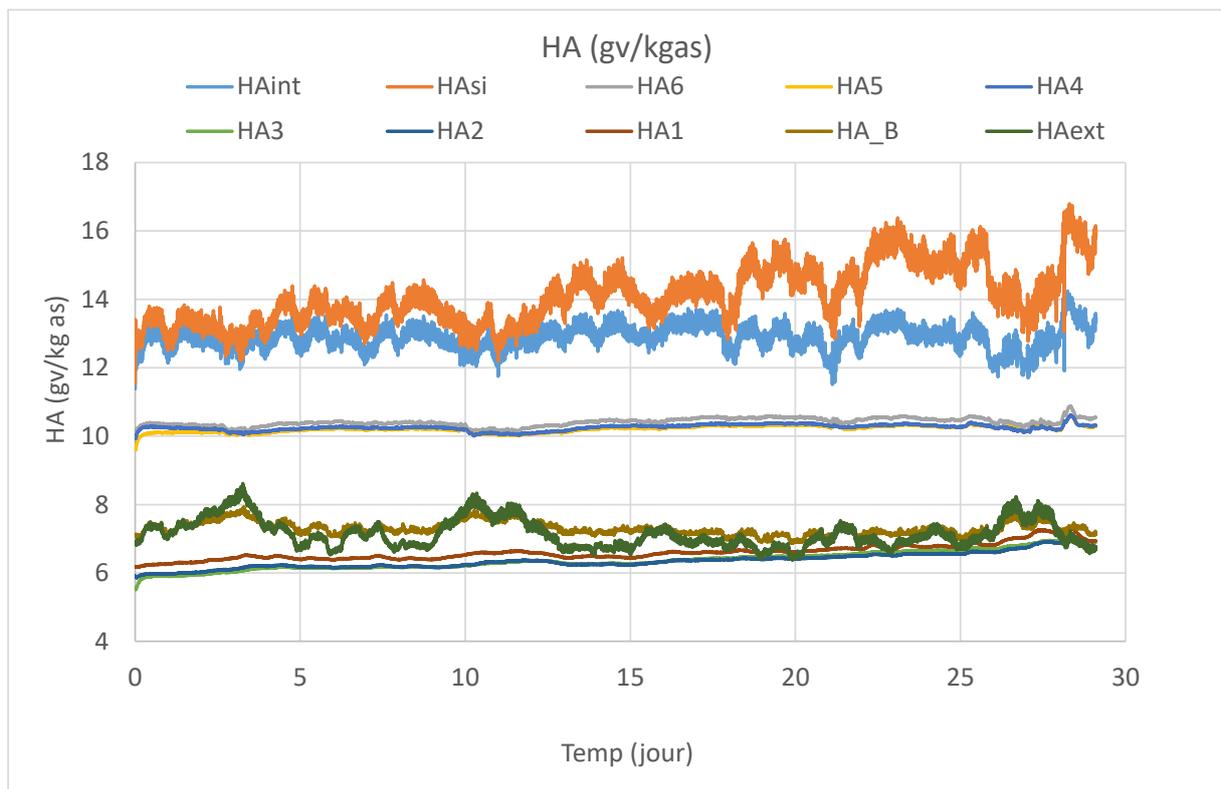


Figure : Humidité absolue en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions normales. Source : Université de Picardie

Résultats du Mur de Moncheaux – Mur_M_défav



Figure : Mise en conditions de l'isolant. Source : Université de Picardie

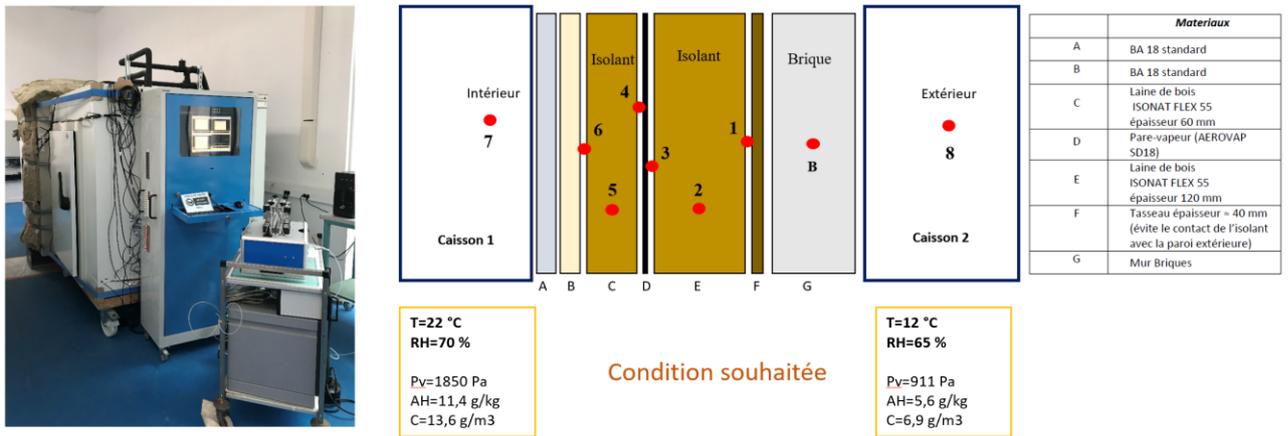


Figure : Positionnement des thermo-hygromètres et condition de test. Source : Université de Picardie

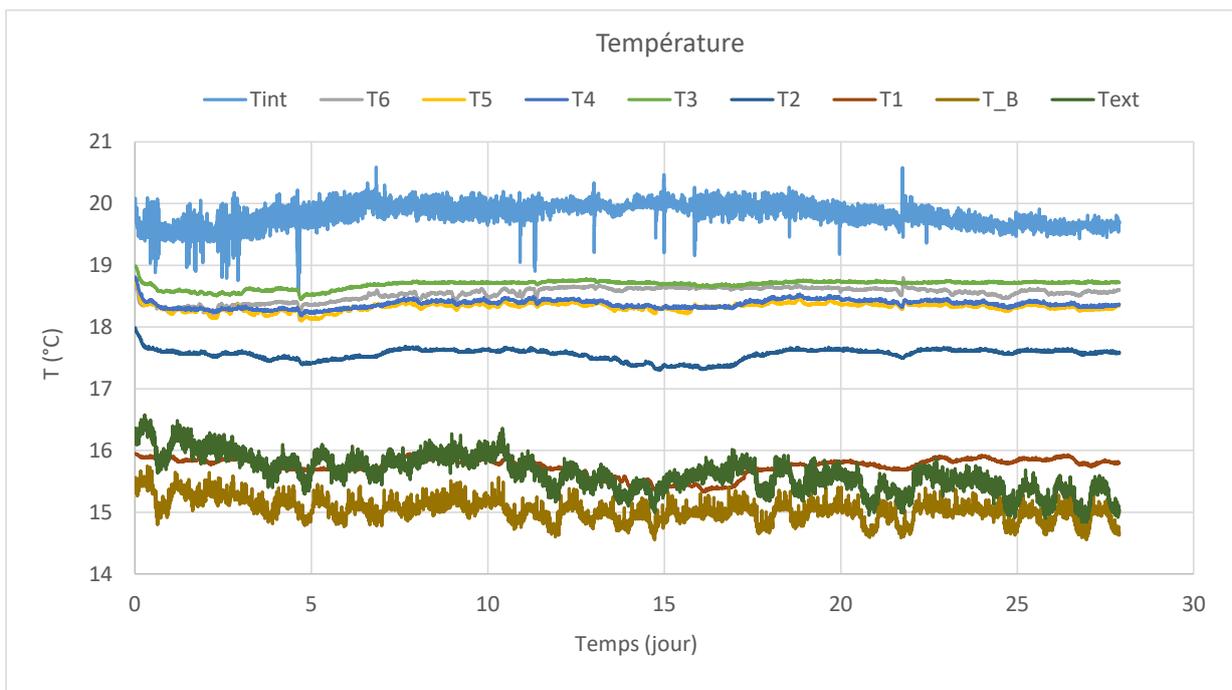


Figure : Température en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions défavorables. Source : Université de Picardie

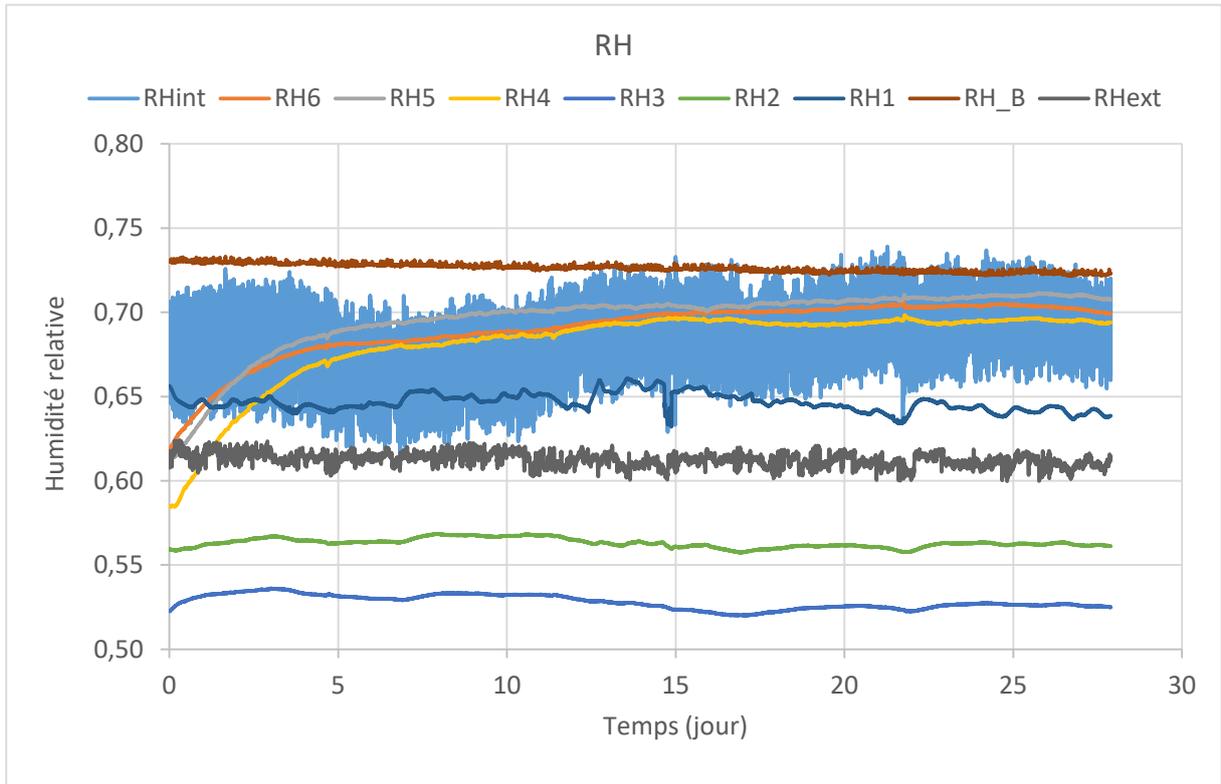


Figure : Humidité relative en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions défavorables. Source : Université de Picardie

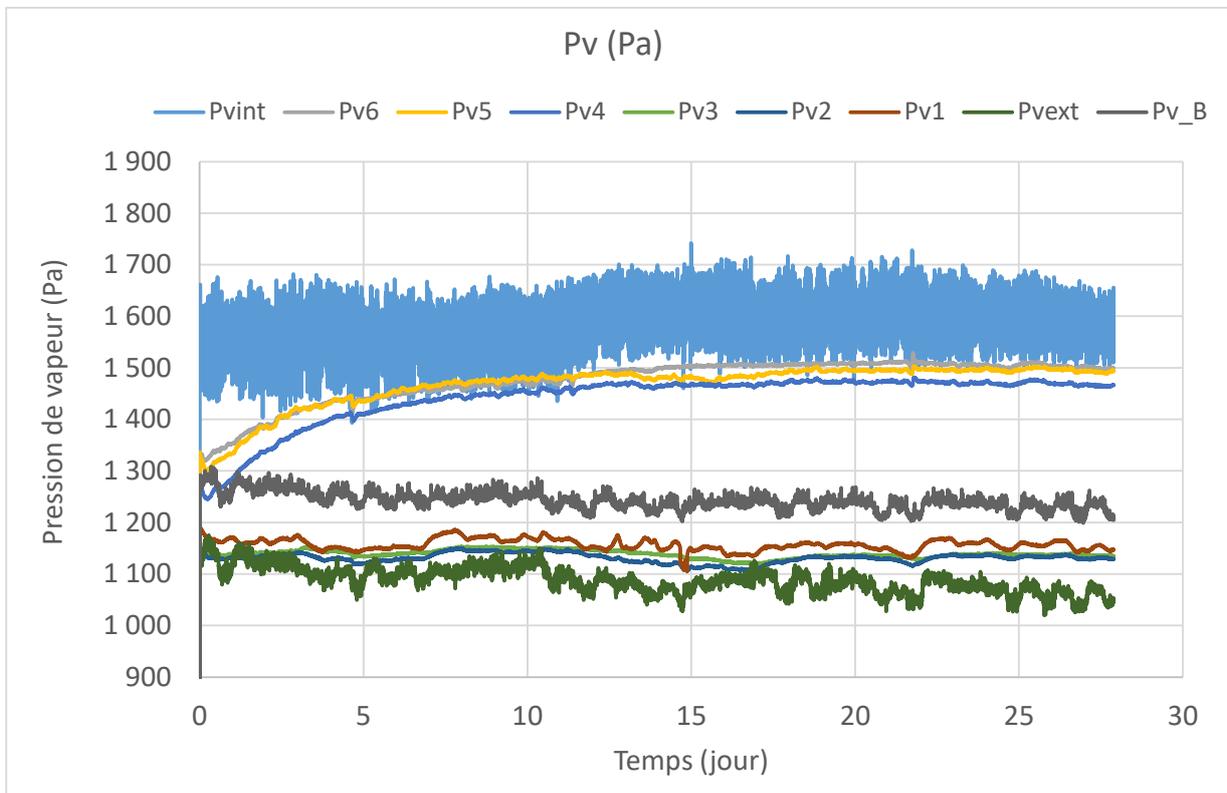


Figure : Pression de vapeur d'eau en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions défavorables. Source : Université de Picardie

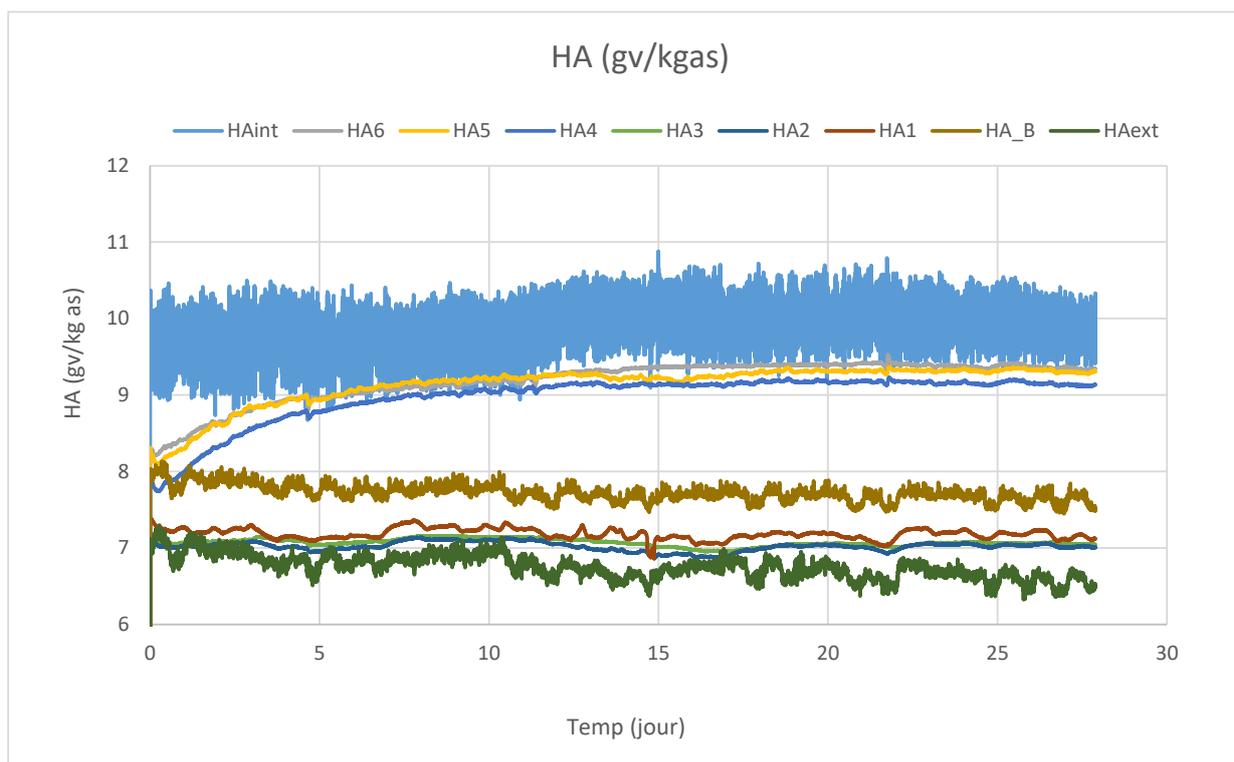


Figure : Humidité absolue en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions défavorables. Source : Université de Picardie

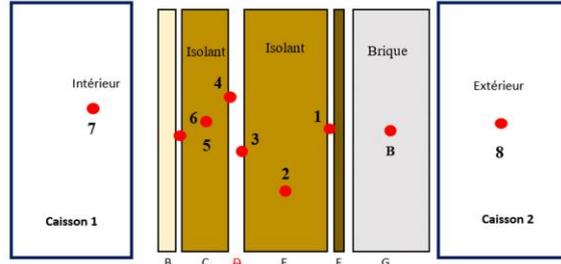
Résultats du Mur de Moncheaux – Mur_M_dégrad

Voici la préparation des essais (paroi mal montée et conditions très défavorables) :

- Pas de pare-vapeur
- Une seule plaque de plâtre BA18 sur la face intérieure du mur
- Humidification des deux épaisseurs de laine de bois (120 mm et 60 mm)
- Injection d'eau sur les côtés (simulation de fuite accidentelle)



Figure : préparation des essais (paroi mal montée et conditions très défavorables). Source : Université de Picardie



	Matériaux
A	BA 18 standard
B	BA 18 standard
C	Laine de bois ISONAT FLEX 55 épaisseur 60 mm
D	Pare-vapeur (AEROVAP SD18)
E	Laine de bois ISONAT FLEX 55 épaisseur 120 mm
F	Tasseau épaisseur = 40 mm (évite le contact de l'isolant avec la paroi extérieure)
G	Mur Briques

T=22 °C
RH=70 %
 Pv=1850 Pa
 AH=11,4 g/kg
 C=13,6 g/m³

Mur n°3
Condition souhaitée

T=12 °C
RH=65 %
 Pv=911 Pa
 AH=5,6 g/kg
 C=6,9 g/m³

Figure : Positionnement des thermo-hygromètres et conditions de test. Source : Université de Picardie

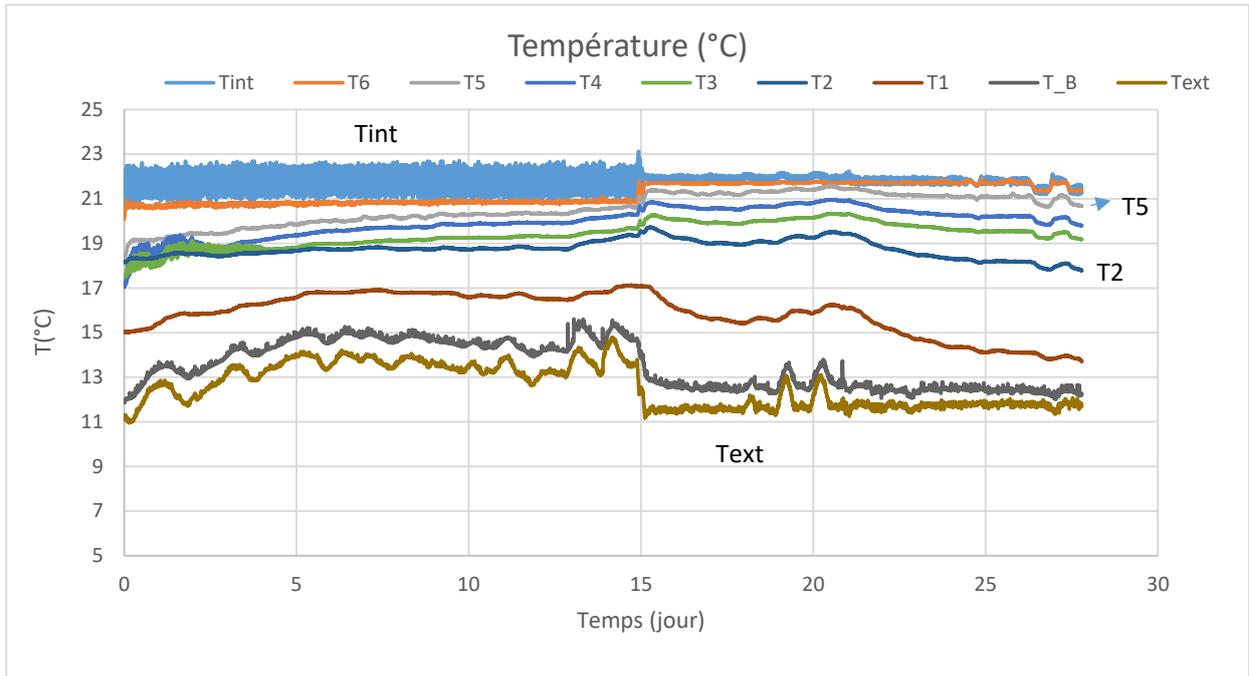


Figure : Température en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions dégradées. Source : Université de Picardie

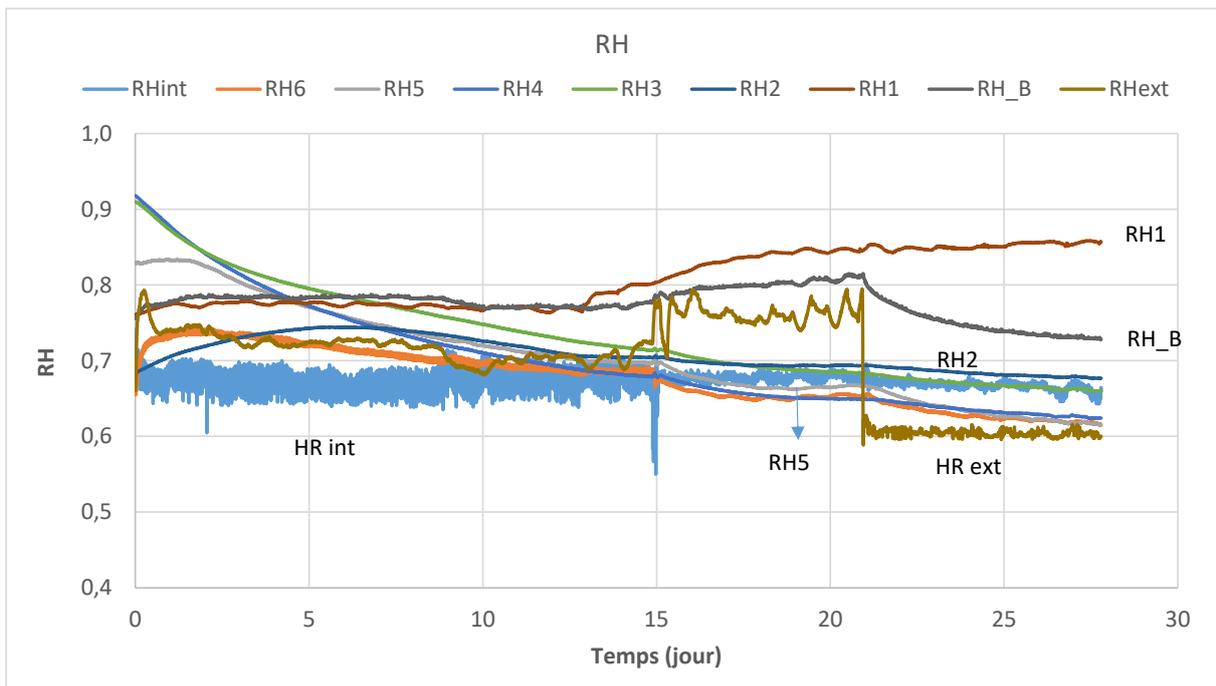


Figure : Humidité relative en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions dégradées. Source : Université de Picardie

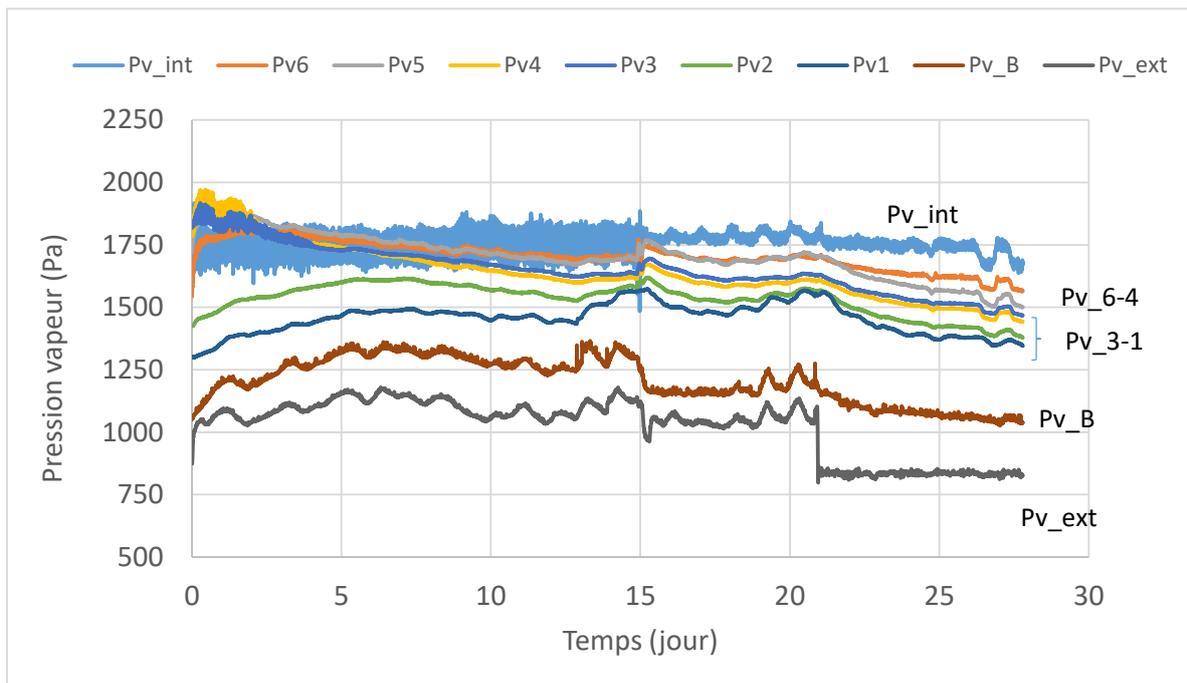


Figure : Pression de vapeur d'eau en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions dégradées. Source : Université de Picardie

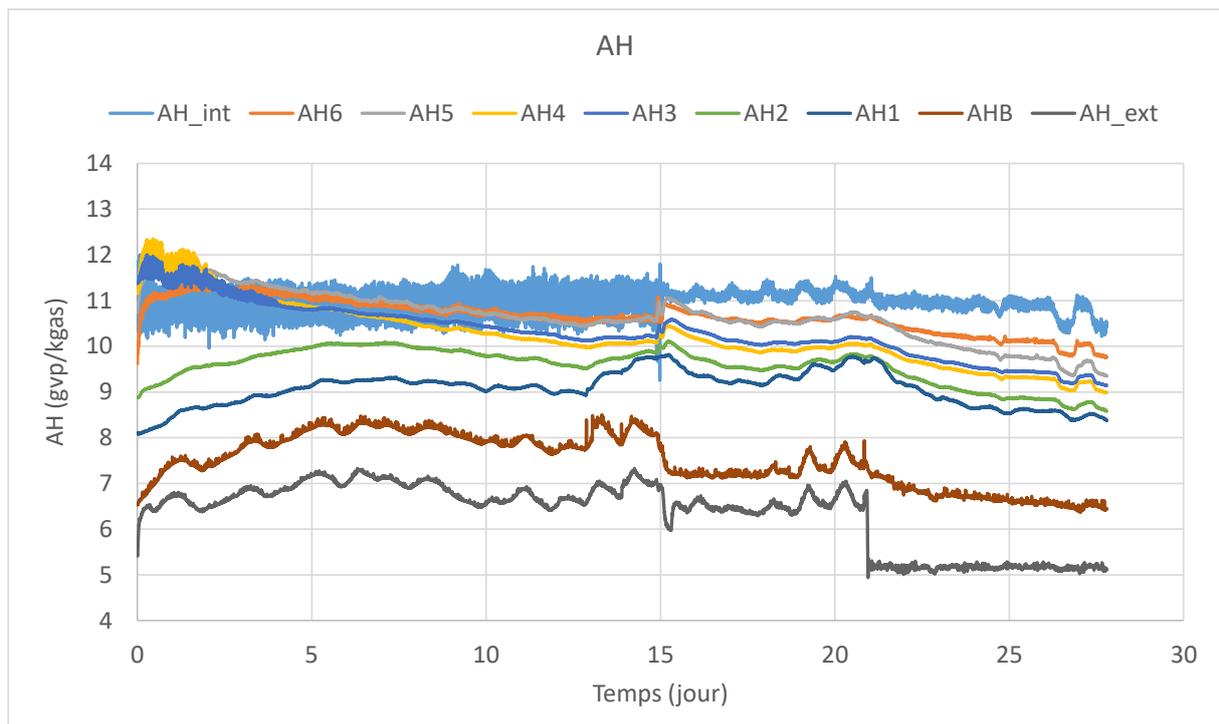


Figure : Humidité absolue en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur en conditions dégradées. Source : Université de Picardie

Résultats du Mur conventionnel – Mur_conv

Matériau	Epaisseur
BA 13	1.3 cm
Kraft	
Isolant (Laine de verre, semi rigide avec Kraft)	120 cm
Lame d'air	5 cm
Brique	35.3 cm



Figure : Reproduction du mur conventionnel. Source : Université de Picardie

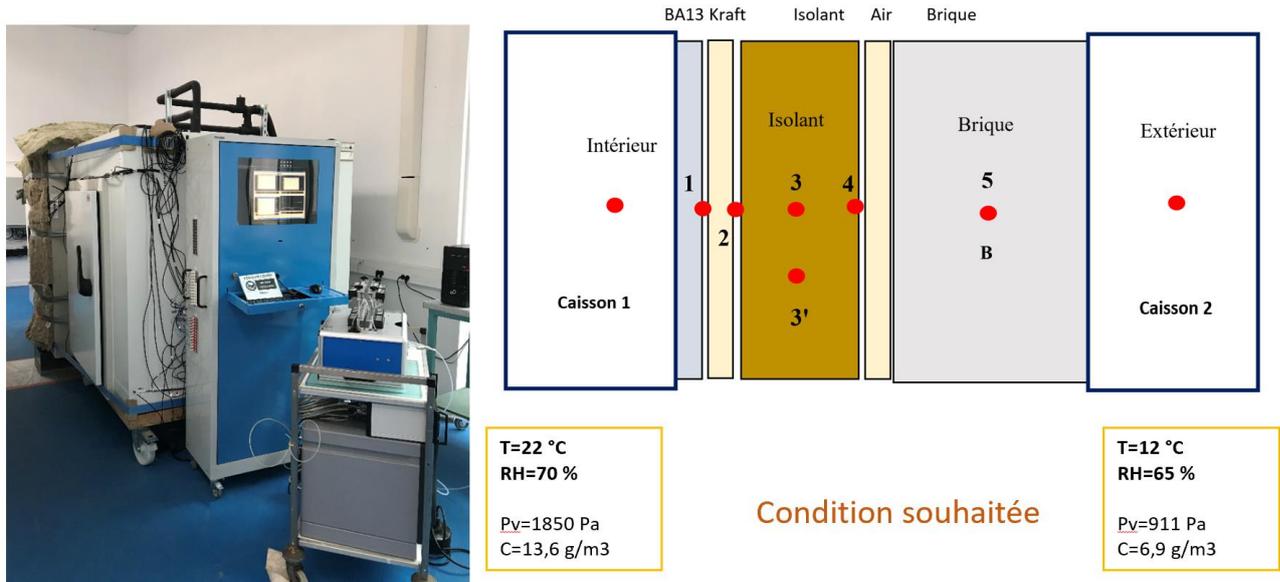


Figure : Positionnement des thermo-hygromètres et condition de test. Source : Université de Picardie

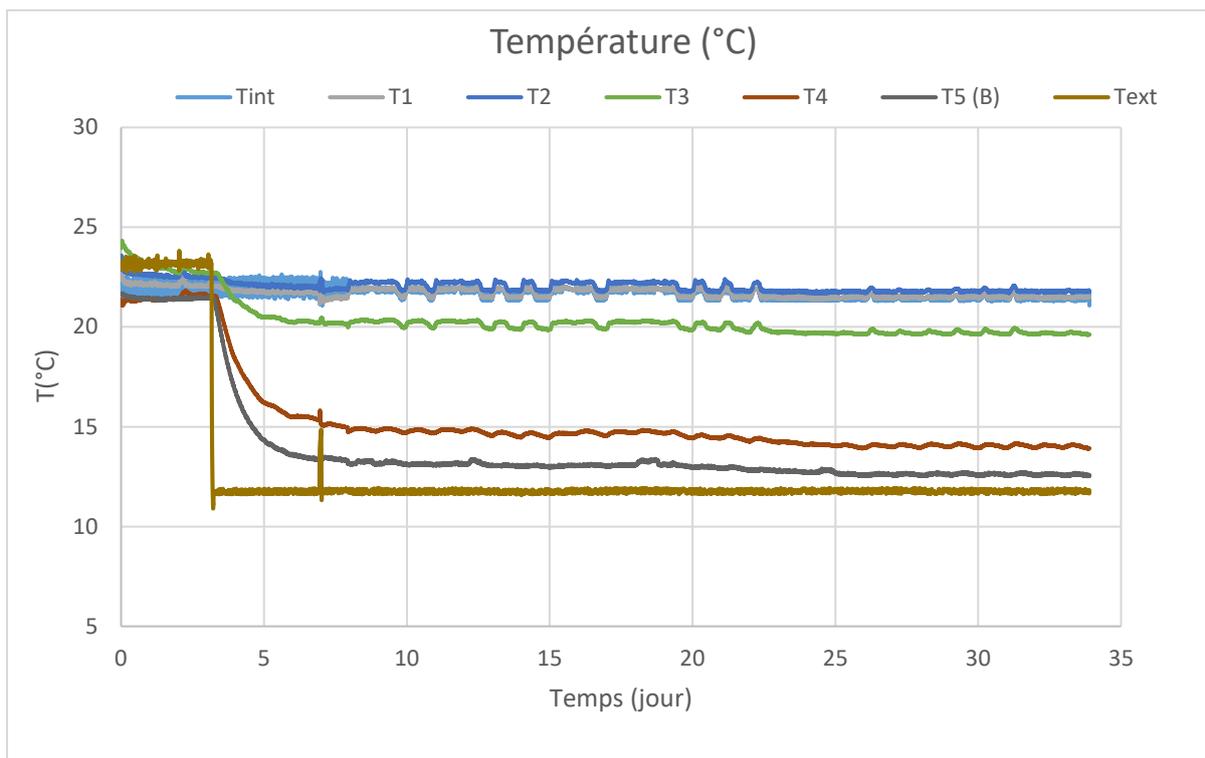


Figure : Température en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur conventionnel. Source : Université de Picardie

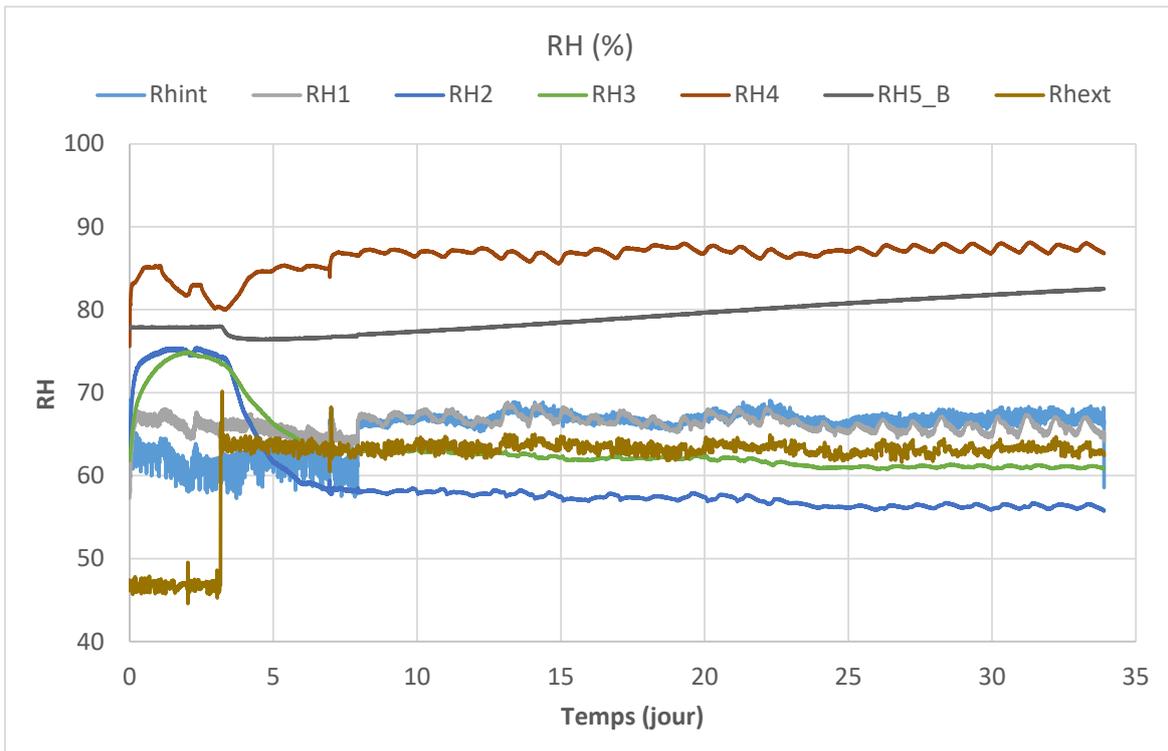


Figure : Humidité relative en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur conventionnel. Source : Université de Picardie

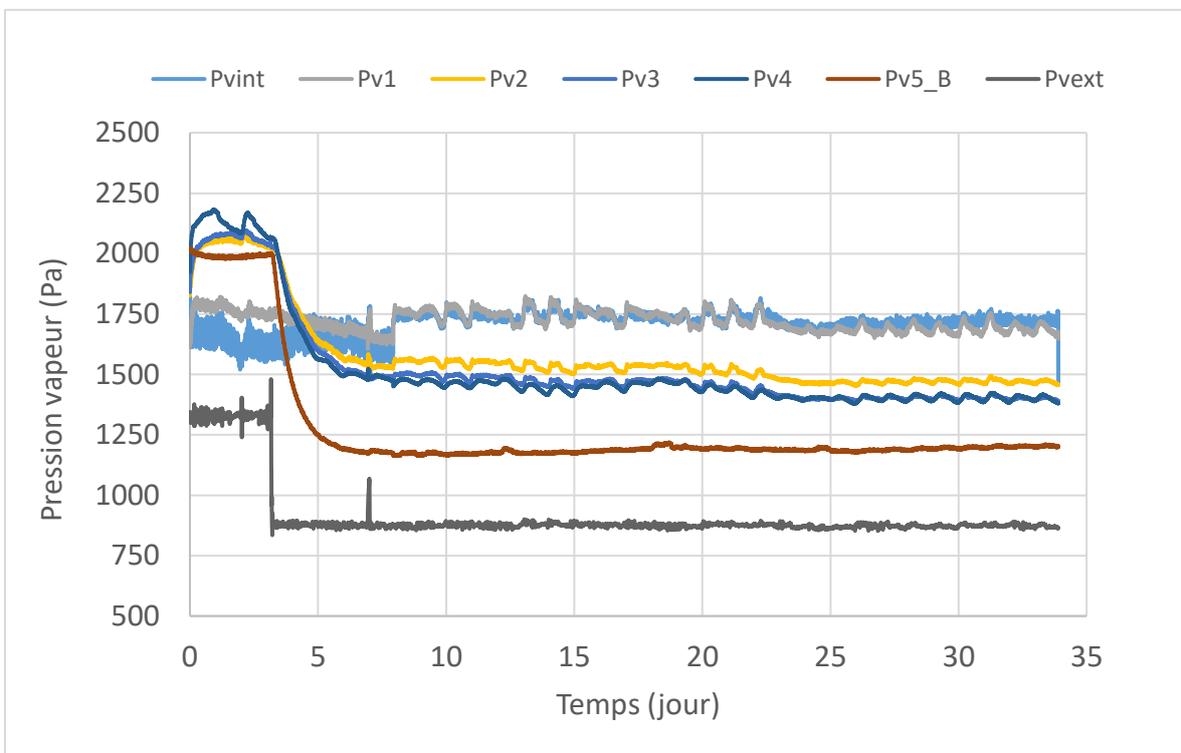


Figure : Pression de vapeur d'eau en fonction du temps pour chaque point de mesure du mur conventionnel. Source : Université de Picardie

Résultats du Mur du groupe scolaire: M_GS

Les photos ci-dessous montrent les éléments de paroi fournis par le fabricant. Pour diverses raisons dont un manque d'isolant, la durée des essais et la disponibilité des cellules climatiques, la paroi complète n'a pu être testée en laboratoire sous conditions climatiques contrôlées.



Figure : Reproduction de la paroi du groupe scolaire et tassement observé (uniquement dans la reproduction). Source : Université de Picardie

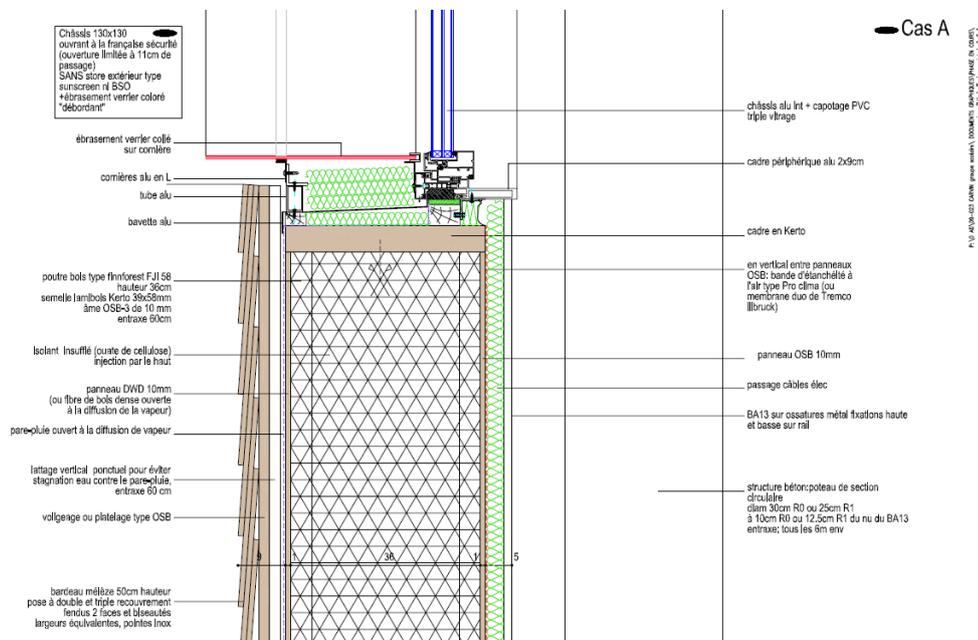


Figure : Schéma de la structure du mur réel du site groupe scolaire. Source : Cabinet d'architecte ayant conçu le groupe scolaire étudié

Annexe 4 – Tableau des valeurs guides du développement microbien (E.V. Brauner et al. / Building a<LOD Environment 82 (2014) 190-202)

Tableau : Valeurs guides du développement microbien. Source : E.V. Brauner et al. / Building a<LOD Environment 82 (2014) 190-202

Table 2
Guideline values for indoor aerosols.

Country/Organization	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	Viable molds (CFU/m ³)	Viable bacteria (CFU/m ³)
Brazil [81,82]			750	
Belgium	40 (24-h)	15 (1-y)		
Canada [83]		40 (1-h)	150 ^a	
China	180 (8-h)	150 (24-h)		2500–7000 ^b
Finland [84]				4500
Germany [85]			1000	1000
Korea [53]				800
Netherlands [86]				10000
Norway		20 (4-h)		
Portugal [87]			500	
Russia [88]			2000–10000 ^c	
Switzerland [89,90]			1000	10000 ^d /1000 ^e
Taiwan	150 (24-h)	100 (24-h)		
USA [91]	150 (24-h)	65 (24-h)	1000	
WHO [92]				500
European Union [93,94]			10000 ^f /2000 ^g	10000 ^f /2000 ^g

^a For a mixture of species.

^b Depending on locations such as hotels, movie theatres, libraries and museums.

^c Depending on the fungal species.

^d For aerobic Mesophilic bacteria.

^e For Gram-negative bacteria.

^f For private homes.

^g For Non-industrial indoor locations.

Annexe 5 – Méthodologie déployée *in situ*

Mesures dans l'air intérieur

Deux campagnes de terrain saisonnières (hiver et été) ont été réalisées sur les deux sites (salle des mariages de la mairie de Moncheaux et groupe scolaire). Les dates des campagnes sont les suivantes :

- a) Moncheaux :
 - Été : 08-19/07/2019 + prélèvements de quelques surfaces le 03 au 05/09/2019 car les premiers prélèvements d'été ont été perdus
 - Hiver : 28/01/2020 au 05/02/2020
- b) Groupe scolaire :
 - Hiver : 22/02/2021 au 05/03/2021
 - Été : 12-26/07/2021

Afin d'assurer une bonne qualité de mesure, l'instrumentation posée compte différentes techniques dont les résultats se recouvrent partiellement, éventuellement avec un pas de temps différent. Le but de cette redondance est, d'une part de s'assurer que des résultats soient exploitables même en cas de défaillance d'un instrument, d'autre part de permettre un recoupement des données afin de clarifier ou de confirmer des résultats partiels avec une autre technique.

Pour mesurer la qualité de l'air, sont ainsi posés :

- Des capteurs HoBo enregistrant température et pression en continu pendant les 2 semaines,
- Une station de mesure environnementale Fireflies enregistrant température, pression, hygrométrie, poussières, CO₂, COV totaux et légers,
- Une station de mesure NEMo enregistrant température, hygrométrie, CO₂, COV totaux et formaldéhyde,
- Un chromatographe de terrain GC Companion à capteur FID pour le screening des composés organiques, capable d'une analyse toutes les 90 minutes, sur un prélèvement fait en 20 minutes,
- Des tubes passifs de recueil des aldéhydes (tubes de Tera Environnement, analysés en laboratoire), mesurant la teneur moyenne par semaine. Deux points de mesures sont retenus, au centre de la salle et dans un coin.
- Un pompage actif durant 24h (3h par tube) afin de mesurer les **concentrations** de COV **dans l'air intérieur et de les identifier plus finement**.
- De plus, les concentrations de COV dans **l'air extérieur** ont été mesurées pendant 24 heures par pompage actif également au **groupe scolaire en hiver** pour estimer les contributions de l'air extérieur aux concentrations de COV dans l'air intérieur.



Figure : De gauche à droite : un capteur HoBo, un tube passif sur son support, le GC Companion et l'ordinateur associé, la balise NEMo et la station Fireflies. Source : Cerema

Ces divers capteurs ont été posés sur chaque site pour deux semaines par campagne, avec une campagne d'été et une campagne d'hiver. Les résultats sont présentés dans le corps du rapport.

Mesures surfaciques

Pour caractériser l'**émission surfacique** de COV, deux FLECs ont été installées sur les différentes surfaces (tableau 1 et 2 + figure 1). L'échantillonnage a eu lieu avec de tubes Tenax TA et de cartouches DNPH pour l'analyse par TD_GC_MS/FID (désorption thermique avec chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse et à la détection par ionisation de flamme) et HPLC/UV (chromatographie liquide haute performance avec détection d'ultraviolet), respectivement. Les méthodes analytiques utilisées sont décrites en détail par M. Tobon [24].



Figure : Installation des cellules FLECs sur les différentes surfaces de l'atelier 7/8 du groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe

Tableau : Surfaces caractérisées à Moncheaux avec le nombre d'échantillons prélevés et l'heure d'échantillonnage de chaque surface. Source : IMT Nord-Europe

Surface	Nombre de prélèvement (n)		Heure d'échantillonnage	
	Été	Hiver	Été	Hiver
Mur SE-1.5 m	5	2	04h-00h (+1)	09h-15h
Mur SE-0.5 m	3	-	10h-19h	-
Mur NO-1.5 m	3	3	02h-14h	08h-15h
Mur SO-1.5 m	1	3	14h-17h	15h-00h (+1)
Mur 1-1.5 m	2	3	11h-17h	09h-17h
Mur 2-1.5 m	1	3	14h-17h	08h-17h
Plafond	1	3	14h-17h	08h-17h
Poutre	1	3	14h-17h	15h-00h (+1)
Sol	2	2	11h-17h	09h-15h

Tableau : Surfaces Caractérisées dans le groupe scolaire avec le nombre d'échantillons prélevés et l'heure d'échantillonnage de chaque surface. Source : IMT Nord-Europe

Surface	Nombre de prélèvement (n)		Heure d'échantillonnage	
	Hiver	Été	Hiver	Été
Mur SE-2.5 m	3	-	10h-19h	10h-19h
Mur SE-1.5 m	9	9	10h-13h (+1)	10h-13h (+1)
Mur SO-2.5 m	3	-	10h-19h	10h-19h
Mur SO-1.5 m	9	9	10h-13h (+1)	10h-13h (+1)
Mur NO-2.5 m	3	-	10h-19h	10h-19h
Mur NO-1.5 m	3	3	10h-19h	10h-19h
Paroi	3	3	10h-19h	10h-19h
Plafond	3	3	10h-19h	10h-19h
Sol	3	3	10h-19h	10h-19h
Dalle	-	3	-	FLEC au labo

Annexe 6 – Tableau des valeurs des COV majeurs mesurées dans l'air intérieur sur chacun des 2 sites, en été comme en hiver

Tableau : Les COV majeurs ($C > 1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) dans l'air intérieur à Moncheaux en été. Source : IMT Nord-Europe

Composé	9-12h	12h-15h	15h-18h	18h-21h	21h-00h	00h-03h	03h-06h	06h-09h	Moyenne	Ecart-type
Formaldehyde	63,5	45,3	AP*	AP	AP	AP	65,3	47,6	27,7	10,4
Acetaldehyde	45,2	30,5	AP	AP	AP	AP	46,7	32,2	19,3	8,5
Propanone	30,6	22,6	AP	AP	AP	AP	28,9	24,7	13,4	3,7
Propanal	4,1	2,8	AP	AP	AP	AP	4,2	3,1	1,8	0,7
Methyl Vinyl Ketone	3,9	2,3	AP	AP	AP	AP	3,7	2,4	1,5	0,9
Methyl Ethyl Ketone	3,6	2,3	AP	AP	AP	AP	3,1	2,4	1,4	0,6
Butanal	3,6	3,1	AP	AP	AP	AP	3,8	2,9	1,7	0,4
Benzaldehyde	3,9	2,8	AP	AP	AP	AP	4,2	3,1	1,7	0,6
Isopentanal	1,3	0,8	AP	AP	AP	AP	0,3	0,8	0,4	0,4
Pentanal	6,9	4,4	AP	AP	AP	AP	7,3	4,6	2,9	1,5
Glyoxal	0,3	0,4	AP	AP	AP	AP	0,4	0,4	0,2	0,0
Methylglyoxal	5,9	3,4	AP	AP	AP	AP	6,1	3,6	2,4	1,5
Hexanal	18,8	12,7	AP	AP	AP	AP	19,5	13,5	8,1	3,5
Toluene	0,9	1,0	1,0	1,1	1,5	2,2	1,4	0,9	1,3	0,5
Tetrachloroethylene	10,9	15,2	6,1	6,7	24,8	26,3	7,9	7,0	13,1	8,2
m+p - Xylene	1,2	0,9	NQ	1,0	1,1	1,2	1,1	1,1	1,0	0,1
2-Butoxyethanol	0,4	0,5	0,5	0,6	0,9	1,2	0,5	0,8	0,7	0,3
2-Heptanone	0,2	1,0	0,7	1,1	1,6	1,4	0,6	1,0	0,9	0,4
Acetic Acid	2,1	1,6	1,9	2,4	2,5	3,5	0,4	0,8	1,9	1,0
Phenol + Hexanoic Acid	6,7	9,2	8,1	9,3	12,9	14,0	7,4	10,5	9,8	2,6
Phthalate	0,5	0,9	1,0	1,4	1,1	1,4	0,8	1,2	1,0	0,3
TVOC***	77,9	100,0	95,5	108,0	142,2	105,8	77,6	NQ**	88,4	21,9

*AP: échantillon perdu en raison d'un problème d'analyse

**NQ: non-quantifiable

***TVOC : somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

Tableau : Les COV majeurs ($C > 1 \mu\text{g.m}^{-3}$) dans l'air intérieur à Moncheaux en hiver. Source : IMT Nord-Europe

Composé	16h-19h	19h-22h	22h-01h	01h-04h	04h-07h	07h-10h	10h-13h	13h-16h	Moyenne	Ecart-type
Formaldehyde	6,0	19,9	6,6	27,5	26,6	18,9	15,2	2,1	15,3	9,6
Acetaldehyde	9,9	7,2	7,6	6,5	21,7	5,0	5,0	59,9	15,3	18,8
Propanone	33,6	28,5	24,3	19,5	66,1	23,9	24,7	146,3	45,9	43,1
Propanal	0,2	0,0	0,2	1,5	1,4	0,9	0,7	0,1	0,6	0,6
Methyl Vinyl Ketone	0,3	0,6	0,4	0,9	1,3	0,7	0,4	1,1	0,7	0,4
Methyl Ethyl Ketone	1,7	2,0	1,1	1,6	3,7	1,8	1,6	4,1	2,2	1,1
Butanal	0,3	0,7	0,2	1,2	1,1	0,6	0,5	0,1	0,6	0,4
Benzaldehyde	0,3	1,1	0,5	1,4	1,3	1,1	0,6	0,2	0,8	0,5
Pentanal	0,3	1,3	0,3	1,8	2,2	1,1	0,8	1,0	1,1	0,7
Methylglyoxal	0,5	1,3	0,3	1,7	1,8	1,2	0,9	0,2	1,0	0,6
Hexanal	0,7	3,3	0,7	5,1	5,3	3,1	1,9	0,2	2,5	2,0
Toluene	0,6	0,6	0,5	0,7	0,6	1,1	0,9	0,7	0,7	0,2
1-Butanol + Benzene	0,7	1,2	1,5	2,4	1,7	1,2	0,6	1,0	1,3	0,6
Acetic Acid	0,6	1,5	2,4	1,5	1,7	1,5	0,6	0,8	1,3	0,6
Propylene glycol	0,4	0,9	1,1	1,4	1,0	0,8	0,4	0,5	0,8	0,3
Hexanal	0,4	1,9	2,6	2,5	3,7	1,3	0,2	0,6	1,7	1,2
Furfural	1,2	1,0	1,3	1,8	1,8	1,2	0,8	0,9	1,3	0,4
α -Pinene	0,7	1,1	1,8	3,9	2,2	1,3	0,6	1,1	1,6	1,1
Octanal	1,0	2,0	2,6	3,0	3,0	1,7	0,7	1,1	1,9	0,9
3-Carene	0,4	0,9	1,4	2,2	2,2	1,0	0,3	0,4	1,1	0,8
2-Ethyl-1-hexanol	1,6	1,9	2,3	2,9	2,9	2,1	1,3	1,3	2,1	0,6
Nonanal	2,0	3,4	4,2	4,2	4,2	2,6	1,4	1,8	3,0	1,2
Benzoic + Octanoic Acid	4,9	3,4	3,3	3,2	3,5	4,0	5,3	4,3	4,0	0,8
Decanal	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	0,8	0,5	0,7	0,9	0,2
Nonanoic Acid	1,4	0,9	1,2	1,0	1,5	1,5	1,1	1,0	1,2	0,2
Heptanal	0,0	0,7	0,9	1,0	1,1	0,5	0,1	0,3	0,6	0,4
Phenol + Hexanoic Acid	3,7	3,0	4,1	5,2	3,9	3,9	3,1	2,6	3,7	0,8

Limonene	0,3	0,4	0,9	1,2	1,1	0,7	0,3	0,2	0,6	0,4
Heptanoic Acid	0,9	0,7	0,8	1,1	0,9	0,7	0,7	0,7	0,8	0,2
2-Ethyl Hexanoic Acid + Dimethylglutarate	1,2	1,3	1,5	1,7	1,7	1,4	1,0	0,9	1,3	0,3
TVOC*	50,8	47,3	54,8	61,4	69,2	52,5	44,9	37,0	52,2	9,9

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

Tableau : Les COV majeurs ($C > 1 \mu\text{g.m}^{-3}$) dans l'air intérieur du groupe scolaire en été. Source : IMT Nord-Europe

Composé	10h-13h	13h-16h	16h-19h	19h-22h	22h-01h	01h-04h	04h-07h	07h-10h	Moyenne	Ecart-type
Formaldehyde	12,7	17,3	AP	AP	AP	AP	AP	AP	15	
Acetaldehyde	2,0	3,1	AP	AP	AP	AP	AP	AP	2,5	
Isopropyl Alcohol	1,1	1,5	1,4	1,7	1,5	1,5	1,3	1,3	1,4	0,2
Acetic acid	0,8	2,3	4,4	4,5	3,8	0,0	3,0	3,4	2,8	1,6
1-Butanol + Benzene	0,5	1,0	1,3	2,1	2,3	2,5	1,9	1,1	1,6	0,7
1-Methoxy-2-propanol	0,3	0,6	0,6	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,7	0,2
Propylene glycol	0,3	3,1	3,8	4,4	4,7	5,2	4,7	4,0	3,8	1,5
Toluene	0,6	2,1	1,6	2,1	2,4	2,8	2,7	2,1	2,0	0,7
2,4-Dimethyl-3-pentanone	0,2	0,5	0,5	1,4	1,7	1,9	1,4	0,5	1,0	0,7
m+p-Xylene	0,5	2,2	1,7	1,9	1,7	1,6	2,0	2,1	1,7	0,5
2-Heptanone	0,1	0,7	0,8	1,0	1,2	0,9	1,2	0,7	0,8	0,3
Styrene	0,1	0,5	0,5	1,4	2,1	2,4	1,8	0,4	1,2	0,9
Heptanal	0,1	0,3	0,5	0,7	1,1	0,9	0,9	0,4	0,6	0,4
2-Butoxy ethanol	0,2	0,9	1,1	1,4	1,6	1,6	1,6	1,1	1,2	0,5
1-Butoxy-2-propanol	0,5	2,8	3,4	5,3	5,6	5,8	5,2	3,4	4,0	1,8
Benzaldehyde	0,9	5,2	5,5	6,3	5,9	6,1	6,3	6,1	5,3	1,8
α -Pinene	0,8	1,2	1,3	1,2	1,1	1,0	1,9	1,2	1,2	0,3
Phenol + Hexanoic Acid	2,2	14,8	16,0	20,2	20,5	22,4	21,6	17,3	16,9	6,5
Octanal	0,3	2,1	2,7	3,5	4,3	4,0	4,0	2,5	2,9	1,3
1,2,3-Trimethyl benzene	0,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,0	0,3
Alkane (C ₁₂ H ₂₆)	0,2	0,7	1,0	1,6	2,0	2,3	1,6	0,6	1,3	0,7

Decane	0,1	0,6	0,6	0,8	0,9	1,2	0,9	0,7	0,7	0,3
3-Carene	0,4	2,5	2,8	3,6	3,8	3,7	3,9	2,9	3,0	1,2
2-Ethyl-1-hexanol	0,2	4,5	4,7	5,9	6,1	6,3	5,8	3,2	4,6	2,1
D-Limonene	<LOD	0,6	0,3	0,7	0,6	1,0	1,1	0,4	0,6	0,3
Acetophenone	0,1	1,5	1,6	2,1	2,1	2,4	2,0	1,6	1,7	0,7
Heptanoic acid	0,7	4,4	4,5	5,5	5,3	6,1	5,8	4,8	4,6	1,7
Nonanal	1,3	8,7	10,1	11,9	13,5	12,8	13,1	9,5	10,1	4,0
Undecane	0,2	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,1	0,9	0,9	0,3
Benzoic acid	1,7	9,0	9,8	5,7	5,1	6,2	6,1	10,3	6,7	2,8
Octanoic acid	1,1	8,3	7,9	9,2	8,7	10,1	9,6	9,8	8,1	2,9
Tetramethylsilane	0,4	1,1	0,7	1,0	1,1	1,3	1,0	2,7	1,2	0,7
Menthol	NQ	1,9	1,6	1,9	2,3	2,6	2,2	2,0	1,8	0,3
Decanal	0,1	1,6	2,3	2,2	2,4	2,5	2,1	1,6	1,8	0,8
2-Phenoxy ethanol	0,4	2,1	2,6	2,9	3,0	4,0	3,2	0,3	2,3	1,3
Benzothiazole	0,4	1,8	2,6	2,4	2,4	2,5	2,2	2,0	2,0	0,7
1-Phenoxy-2-propanol	1,8	11,5	12,4	13,0	12,7	13,0	13,5	13,8	11,4	4,0
Nonanoic acid	0,6	7,4	7,5	8,4	7,9	9,2	8,9	9,2	7,4	2,8
Tridecane	0,2	1,1	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,2	0,4
Tetramethyl Silane	0,3	1,4	1,7	1,7	1,5	1,8	1,7	1,6	1,5	0,5
Tetradecane	0,4	2,1	2,2	3,1	3,4	3,3	3,1	2,3	2,5	1,0
Diethyl phthalate	0,1	1,0	1,0	1,4	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1	0,4
Hexadecane	0,0	1,3	1,7	2,0	2,3	2,4	2,4	1,8	1,7	0,8
Benzophenone	0,1	0,9	1,0	0,8	1,1	1,1	1,1	0,7	0,8	0,4
Diisobutyl phthalate	<LOD	4,0	5,9	4,0	3,2	2,9	3,9	1,8	3,2	1,3
TVOC*	17,2	170,7	183,6	201,7	239,2	240,8	234,7	185,0	184,1	72,9

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

Tableau : Les COV majeurs ($C > 1 \mu\text{g.m}^{-3}$) dans l'air intérieur du groupe scolaire en hiver. Source : IMT Nord-Europe

Composé	10h-13h	13h-16h	16h-19h	19h-22h	22h-01h	01h-04h	04h-07h	07h-10h	Average	Standard Deviation
Formaldehyde	11,4	10,7	8,8	7,8	7,5	6,8	7,9	7,7	8,6	1,6
Acetaldehyde	4,9	4,1	3,1	3,0	2,9	2,7	3,0	3,0	3,4	0,8
Propanone	8,4	4,7	5,3	3,6	3,2	1,7	3,3	3,7	4,2	2,0
Propanal	1,0	1,1	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,2
Methyl Ethyl Ketone	2,1	1,3	1,0	0,9	1,1	0,8	0,8	1,1	1,1	0,4
Butanal	1,0	0,8	0,8	0,6	0,7	0,8	0,7	0,9	0,8	0,1
Benzaldehyde	2,1	2,0	1,7	1,6	1,7	1,4	1,4	1,2	1,6	0,3
Hexanal	2,1	1,9	1,6	1,6	1,5	1,6	1,6	1,5	1,7	0,2
Isopropyl Alcohol	1,1	1,2	0,8	2,0	0,8	0,7	1,0	1,6	1,1	0,4
1-Butanol + Benzene	3,8	2,2	1,1	1,6	0,9	0,9	0,8	0,8	1,5	1,0
Toluene	1,4	0,9	0,7	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,3
m+p-Xylene	1,9	1,3	1,0	0,9	0,9	1,0	1,3	1,2	1,2	0,3
1-Butoxy-2-propanol	26,1	12,5	4,7	3,7	2,9	2,5	2,2	2,0	7,1	8,4
Benzaldehyde	4,1	3,2	2,5	2,4	2,2	2,0	2,2	2,0	2,6	0,7
Alkene (C10H16)	1,1	0,6	0,4	0,5	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,3
Octanal	0,5	0,8	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,3	1,2	0,3
D-Limonene	1,3	0,8	0,3	0,4	0,2	0,2	0,3	0,5	0,5	0,4
Acetophenone	1,0	1,2	1,0	0,8	1,0	1,0	0,8	1,1	1,0	0,1
Nonanal	2,1	2,6	3,5	3,4	3,5	3,6	3,5	3,3	3,2	0,5
Benzothiazole	1,2	1,1	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	1,3	1,0	0,2
1-Phenoxy-2-propanol	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3	0,1
TVOC*	83,9	62,2	NQ	47,1	46,2	42,2	43,3	39,1	45,5	15,9

*TVOC : Somme de tous les COV entre C6 et C16 quantifiés par analyse GC-FID en équivalent toluène

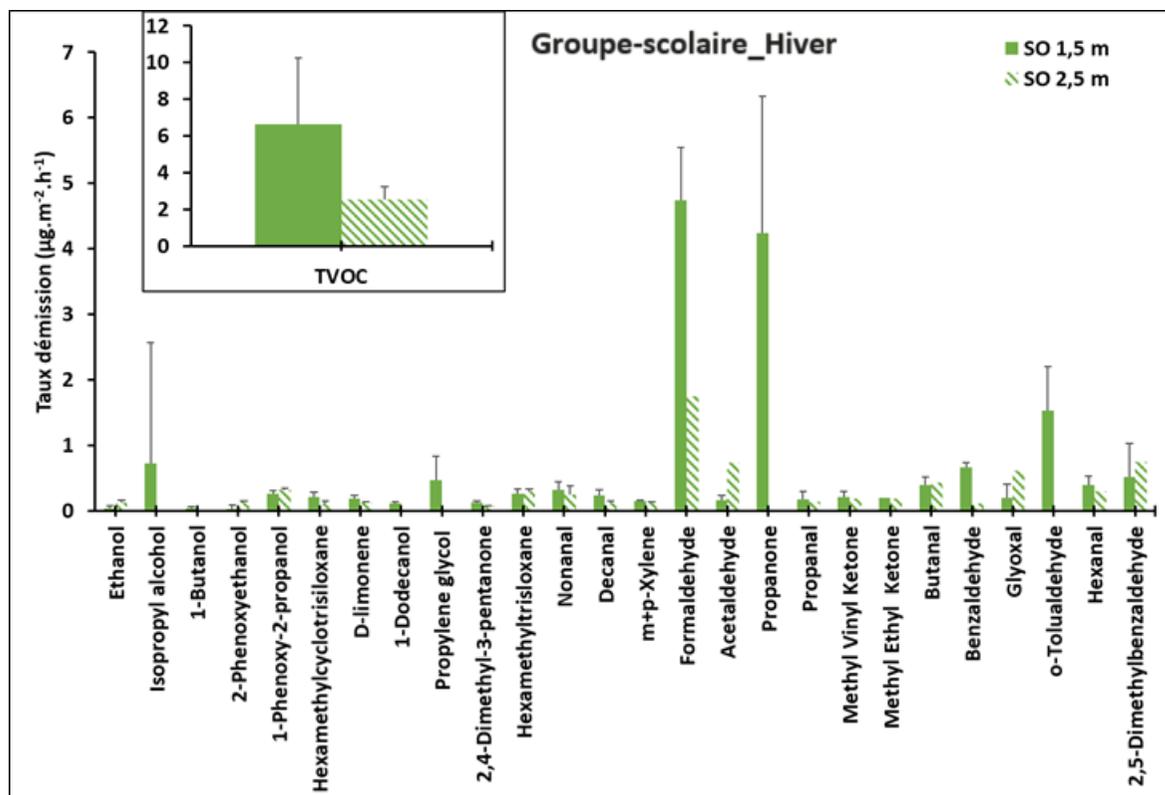


Figure : Variation spatiale hivernale des émissions de COV du mur orienté Sud-Ouest (SO) dans le groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe

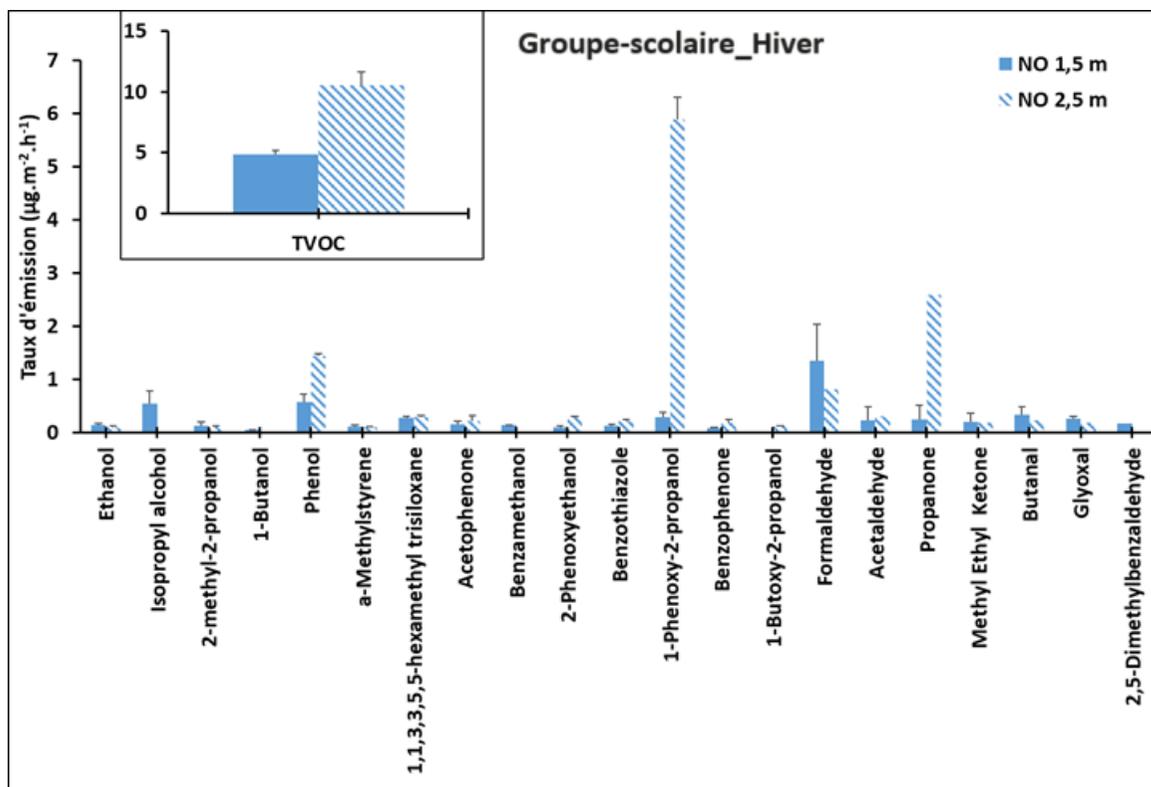


Figure : Variation spatiale hivernale des émissions de COV du mur orienté Nord-Ouest (NO) dans le groupe scolaire. Source : IMT Nord-Europe

Annexe 7 – Foire aux questions du projet EmiBio

Quelles différences / ressemblances entre les 2 bâtiments suivis ?

Les 2 bâtiments étudiés sont très différents : le premier est une salle des mariages totalement réhabilitée en 2013, isolée en laine de bois par l'intérieur avec une structure lourde en brique, tandis que le second bâtiment est un bâtiment construit en 2012 isolé via des caissons remplis de ouate de cellulose. L'enveloppe de ce second bâtiment n'est pas porteuse. En revanche, les 2 bâtiments ont été sélectionnés pour leur bonne mise en œuvre, leur système de ventilation double flux, leur isolation en matériaux biosourcés et dans des conditions climatiques similaires (région Hauts-de-France).

Les émissions sont-elles corrélées aux augmentations de température dans la paroi ? D'humidité relative ? Est-ce le même constant dans chaque couche de matériaux ? Y-a-t-il une différence selon l'exposition ?

Oui, les émissions sont fortement corrélées à la température mais surtout à l'humidité relative, et ceci de manière exponentielle. Plus la température et/ou plus l'humidité relative augmentent, plus les émissions sont importantes. Ceci est d'autant plus marqué avec l'humidité relative, qui est donc le facteur prépondérant à retenir. A noter qu'il existe un seuil d'« épuisement » de la source de COV pour chaque matériau, qui diffère d'un matériau à l'autre, sa mise en œuvre et de son environnement. Ceci permet d'expliquer la faible émissivité de la laine minérale seule qui, par son procédé de fabrication, a été fortement chauffée en usine.

En revanche, cet effet est variable d'un matériau à l'autre, qu'il s'agisse du matériau pris seul, ou de la paroi dans laquelle il est inséré. Les émissions sont également variables selon l'orientation de la paroi et de la saisonnalité (ce qui est directement relié aux conditions hygrothermiques de la paroi).

Les émissions de polluants majoritaires sont-elles corrélées aux concentrations en micro-organismes dans l'air ? Les concentrations de COV dans l'air sont-elles corrélées aux concentrations en micro-organismes dans l'air ?

Le panel de tests réalisé à la fois sur 2 sites réels et en laboratoire n'a pas mis en évidence une émission majoritaire liée à la présence de micro-organismes (bactéries et/ou moisissures). D'une part, sur les 2 sites réels suivis et les parois reconstituées, les moisissures n'ont pas été retrouvées en concentration (UFC = unité formant colonies) suffisante permettant de conclure à un développement microbien au sein de la paroi ou à une source intérieure. Ceci est très bon signe, car cela signifie que la réalisation des parois / bâtiments selon les règles de l'art et/ou la sélection des matériaux a permis de limiter voire d'éviter dans le cas de la ouate de cellulose le développement de moisissures et de bactéries. Ensuite, lors des tests sur parois réelles, même en conditions hygrothermiques défavorables, le développement de micro-organisme est resté faible (laine de bois) voire nul (ouate de cellulose). Ce n'est que dans le cas d'une paroi mal constituée et soumise à des conditions hygrothermiques défavorables (trou dans le pare-vapeur voire oubli du pare-vapeur) que le développement fongique a pu être suffisant pour être détecté à l'ouverture de la paroi.

Quel matériau seul émet le plus ?

Les émissions sont très variables dans le temps et sont fonction de l'humidité relative et de la température. Chaque matériau réagit différemment à ce couple de paramètre dans le temps. S'il fallait comparer et en regardant les émissions à 28 jours à 75-80 % d'humidité relative en CLIMPAQ, les matériaux les plus émissifs sont ceux constitués de bois (ossature bois et laine de bois). Vient ensuite le panneau OSB du site n°1, la ouate de cellulose du site n°2, le pare-vapeur du site n°1 et enfin le plâtre, matériau très peu émissif. Attention cependant, à une humidité relative plus faible, cet ordre ne serait pas le même ([voir paragraphe 4](#)).

Concernant les émissions des matériaux seuls : ces émissions sont-elles corrélées avec ce qui est observé en émission de paroi ?

Aucune corrélation n'a pu être mise en évidence entre d'une part les émissions des matériaux seuls et les émissions des parois, et d'autre part les émissions des parois et les polluants retrouvés dans l'air sur les cas observés. Ceci peut s'expliquer par plusieurs facteurs : le volume de l'air intérieur est important, ce qui rend les émissions provenant des parois faibles au regard du volume d'air disponible, les sources de polluants sont diverses (les matériaux ne sont pas la source prépondérante dans nos cas d'études) et les polluants liés à l'usage / aux activités des occupants peut être largement prépondérants lorsque les matériaux choisis lors de la construction sont peu émissifs et qu'au contraire, les produits utilisés sont agressifs (produits sanitaires anti-Covid notamment). Finalement, tout ceci est très bon signe pour les 2 sites étudiés (et sélectionnés volontairement pour leur bonne mise en œuvre).

Les émissions des parois en cellules tests sont-elles comparables à ce qui est observé sur site ?

Non, mais ceci est normal puisque les conditions hygrothermiques sont volontairement différentes. Les parois reconstituées sont soumises à des conditions hygrothermiques défavorables (dans la plupart des essais) pour accélérer les émissions et le développement microbien tandis que sur site réel, les conditions hygrothermiques constatées étaient très satisfaisantes, y compris à l'intérieur des parois.

Les émissions entre matériaux biosourcés et standards (laine minérale) sont-elles différentes ?

Oui. Ainsi, la laine minérale est très peu émissive en cellule test (CLIMPAQ) tandis que la laine de bois voit ses émissions exploser avec l'augmentation de l'humidité relative. La nature des matières premières (laine de verre minérale vs laine de bois organique) et le procédé de fabrication des matériaux (laine de verre chauffée à haute température) rend les émissions des matériaux seuls totalement différentes, à la fois qualitativement et quantitativement.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



EmiBio

Afin d'ancrer l'utilisation des matériaux biosourcés dans le bâtiment de demain, ce projet a cherché à évaluer leurs émissions spécifiques (venant notamment de micro-organismes ou éventuellement des additifs), tout en prenant en considération les atouts hygrothermiques de ces matériaux. Ce projet EmiBio s'insère ainsi dans une démarche positive auprès de la filière des matériaux biosourcés qu'il convient d'encourager.

Les matériaux biosourcés étudiés sont des isolants, et plus particulièrement la laine de bois et la ouate de cellulose car ce sont les isolants ayant la plus grande part de marché actuellement parmi les matériaux biosourcés (hors bois de structure). Les 2 bâtiments suivis dans le cadre de ce projet sont isolés avec ces matériaux.

Ce projet a permis d'étudier les émissions des matériaux eux-mêmes en laboratoire, mais aussi les émissions des parois contenant ces matériaux, à la fois sur 2 sites réels, mais également en environnement maîtrisé (en cellule expérimentale). L'étude des polluants présents dans l'air des 2 bâtiments réels étudiés n'a pas permis d'établir une signature des émissions des matériaux biosourcés sur la qualité de l'air intérieur, les polluants étant en quantité trop faible dans l'air et non émis spécifiquement par les matériaux biosourcés étudiés. En revanche, le projet a permis de bien mettre en évidence l'absence de développement microbien tant que la gestion de l'humidité relative dans les matériaux / parois est assurée. Un non-respect des règles de l'art en environnement hygrothermique dégradé peut être le siège, quant à lui, de développement microbien. Dans l'air intérieur, aucune espèce spécifique n'a été identifiée pour marquer la présence de matériaux biosourcés.

Ce projet a permis d'étudier les émissions des matériaux eux-mêmes en laboratoire, mais aussi les émissions des parois contenant ces matériaux, sur 2 sites réels et en environnement maîtrisé (en cellule expérimentale).

