



PROJET « AERONS » RAPPORT DE SYNTHÈSE

Août 2021

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
INTRODUCTION	3
1. SYNTHÈSE DE L'ANALYSE DES DONNÉES	3
1. METHODOLOGIE	3
1. Période d'analyse	3
2. Capteurs utilisés	3
3. Environnement d'installation et paramètres d'influence disponibles	4
4. Validation des données	5
2. RESULTATS	6
1. Niveaux de CO ₂ mesurés et informations sur les dépassements de seuils	6
2. Evaluation de l'impact des capteurs Test vs capteurs Contrôle	13
3. Analyse de certains facteurs d'influence	15
2. SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE COMPORTEMENTALE	16
1. METHODOLOGIE	16
2. SYNTHÈSE DES RESULTATS DES QUESTIONNAIRES	17
3. SYNTHÈSE DES ENSEIGNEMENTS DES ENTRETIENS ET RETOURS QUALITATIFS	19
3. CONCLUSIONS DE L'EXPERIMENTATION	20
1. NIVEAUX DE CO ₂ DANS LES ÉTABLISSEMENTS SCOLAIRES	20
2. IMPACT DE LA PRÉSENCE DES CAPTEURS SUR LES PRATIQUES D'AÉRATION	21
3. IMPACT DES PARAMÈTRES D'INFLUENCE SUR LES NIVEAUX DE CO ₂	22
4. PROPOSITIONS DE RECOMMANDATIONS AUX ENSEIGNANTS ET PERSONNEL ÉDUCATIF	23
4. RETOURS D'EXPERIENCE ET RECOMMANDATIONS POUR LA PHASE 2	23
1. RETOURS D'EXPERIENCE SUR LA MISE EN PLACE ET LE SUIVI DE LA PHASE 1	23
2. RECOMMANDATIONS POUR LA PHASE 2	24
TABLE DES FIGURES	27

Introduction

Dans le contexte de l'épidémie de COVID-19, le Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP) recommande d'aérer les espaces clos à partir de 800 ppm (parties par million) de CO₂ dans l'air intérieur, pour s'assurer d'un bon renouvellement de l'air et ainsi limiter les risques de propagation aéroportée du virus.

La Ville de Paris, pour contribuer à la lutte contre la propagation du SARS-CoV-2 en milieu scolaire, a souhaité mettre en place un projet pilote consistant en l'installation de capteurs de CO₂ dans les établissements scolaires, en l'analyse des données collectées et en l'évaluation de l'impact de ces capteurs sur les changements de comportements (pratiques d'aération) des enseignants et personnel éducatif.

Pour ce faire, la Ville de Paris a sollicité Airparif (l'Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air en Île-de-France) pour l'analyse des données issues des micro-capteurs. Deux chercheurs en psychologie sociale, Pauline Van Laere et Xavier Brisbois, ont eux été chargés de mener une étude comportementale.

1. Synthèse de l'analyse des données

1. Méthodologie

1. Période d'analyse

La période d'analyse s'est étendue du 3 mai au 2 juin 2021, soit 20 jours ouvrés en retirant les jours fériés et les weekends, période durant laquelle il n'y a pas de présence au sein des établissements. Une période d'un mois minimum est nécessaire pour pouvoir interpréter de manière fiable les données collectées.

2. Capteurs utilisés

Les capteurs de CO₂ déployés dans le cadre du projet devaient réunir plusieurs caractéristiques : écran facilement lisible et compréhensible ; signal visuel ou sonore en cas de dépassement des seuils préconisés (800 ppm et 1 000 ppm) ; mesure de la température. La Ville de Paris a sélectionné deux modèles :



a)



b)

Figure 1 : Capteurs Class'Air (a) et Nanosense (b) permettant la mesure du CO₂

Le pas de temps des capteurs est de 10 minutes pour Class'Air, et de 2 minutes 30 secondes pour Nanosense. (NB : initialement, le pas de temps prévu pour Nanosense était d'1 seconde).

Pour nourrir l'étude comportementale (cf. *infra*), les capteurs installés ont été divisés en deux catégories :

- Les capteurs Test, dont l'affichage était visible ;
- Les capteurs Contrôle, dont l'affichage était masqué.

Les capteurs ont été installés par un prestataire de la Ville de Paris : Sogetrel. Les données ont été récupérées et mises en base par un autre prestataire, Pando2. Un export de la base de données a été mis à disposition à Airparif et aux chercheurs en psychologie sociale.

D'après le tableau de suivi du prestataire de pose Sogétrel, 311 capteurs au total étaient opérationnels sur la période d'analyse : 194 Class'Air et 117 Nanosense, avec 285 capteurs Test et 26 capteurs Contrôle.

3. Environnement d'installation et paramètres d'influence disponibles

Le périmètre initial de l'étude comportait 500 capteurs installés dans 144 établissements. Toutefois, la mise en œuvre des moyens de mesure a été faite de manière progressive compte tenu du nombre important de capteurs. Ainsi, afin d'obtenir un nombre conséquent de capteurs mesurant sur la même période, 311 capteurs au sein de 112 établissements composent la base de données théorique sur la période du 3 mai au 2 juin 2021.

Ces 311 capteurs ont été installés au sein de 112 établissements, répartis de la manière suivante :

- 57 crèches (171 capteurs) ;
- 21 écoles (74 capteurs) ;
- 34 collèges (66 capteurs).

Le tableau de suivi de Sogétrel comprend les paramètres suivants :

- Type d'établissement (crèche, école, collège) ;
- Identification unique de l'établissement ;
- Type de salle (accueil, classe, dortoir, salle du personnel, réfectoire, autre) ;
- Etage ;
- Type de capteur : Test ou Contrôle.

Des paramètres supplémentaires ont pu être collectés pour les crèches :

- Surface de la salle ;
- Nombre d'ouvrants ;
- Possibilité ou non d'ouverture totale des ouvrants ;
- Nombre de portes ;
- Présence d'une centrale de traitement de l'air (CTA) ;
- Orientation de la salle ;

Enfin, les questionnaires diffusés dans le cadre de l'étude comportementale ont permis de collecter quelques paramètres supplémentaires :

- Surface de la salle ;
- Type de salle ;
- Nombre d'ouvrants ;
- Possibilité ou non d'ouverture totale des ouvrants ;

- Nombre de portes ;
- Nombre d'enfants dans la salle.

Cependant, plusieurs incohérences ont été remarquées entre les caractéristiques renseignées via le tableau de suivi de Sogétrel pour chaque capteur, et les caractéristiques renseignées via les questionnaires.

4. Validation des données

Un travail important de validation des données a été nécessaire, à cause d'un manque de fiabilité de la communication des capteurs qui a occasionné de nombreuses données manquantes. Sur les 311 capteurs présents dans le tableau de suivi de Sogétrel et opérationnels sur la période d'analyse d'un mois, 123 ont dû être écartés de l'analyse, soit un taux de perte de 40%.

1^{ère} Validation dite « grossière »

Une première validation dite « grossière » a conduit à écarter 39 capteurs :

- 8 capteurs n'envoyant aucune donnée ;
- 2 capteurs dont la date d'installation réelle (selon la date d'envoi des premières données) ne correspond pas à la période d'analyse ;
- 1 capteur présent dans l'export Pando2 mais sans correspondance (information sur le DEVEUI) dans le tableau de suivi de Sogétrel ;
- 28 capteurs défectueux avec moins de 50% de données sur la période d'analyse, et offset constant pour 1 capteur.

A ce stade, il reste donc 272 capteurs sur les 311 initiaux (94 Nanosense sur 117 et 178 Class'Air sur 194).

2^{ème} validation dite « fine »

Une seconde validation basée sur des critères plus fins a conduit à écarter 84 capteurs supplémentaires :

- Invalidation des jours ouvrés pour lesquels le capteur a au moins 1 heure avec moins de 50% de données, entre 8h00 et 19h00 (ce qui empêche l'analyse des dynamiques de niveaux de CO₂ au cours de la journée) ;
- Invalidation des capteurs qui n'ont pas plus de 10 jours ouvrés valides sur les 20 jours ouvrés de la période d'analyse.

Correction des offsets des capteurs Nanosense

Lors des premiers jours de mesure de la plupart des capteurs Nanosense (typiquement 7 jours), la ligne de base des capteurs (offset) est visiblement plus élevée que les 400 ppm attendues, avant de revenir à une ligne de base normale suite à une recalibration automatique. Au lieu d'invalider ces capteurs, il a donc été procédé à une correction automatique de cet offset temporaire.

Echantillon final après validation

Après validation, l'échantillon final est de 188 capteurs :

- 71 Nanosense sur 117 installés (60%) ;
- 117 Class'Air sur 194 installés (60%).

Ces capteurs sont répartis sur 92 établissements (sur les 112 établissements initialement dans le périmètre de l'étude sur la période de mesure définies entre le 3 mai et le 2 juin 2021) :

- 47 crèches sur 57;
- 19 écoles sur 21;

- 26 collèges sur 34.

Sur ces 188 capteurs, on dénombre seulement 18 capteurs Contrôle (sur 26 installés), qui sont répartis entre des collèges (9), des écoles (7) et des crèches (2).

Le taux de perte est donc important (40% environ) mais il ne semble pas y avoir de modèle de capteur, de type d'établissement ou de type de salle plus propices à une mauvaise communication des données.

L'échantillon final a permis de produire plus de 1,6 millions de données, dont les résultats de l'analyse sont présentés ci-dessous.

2. Résultats

L'analyse des données de CO₂ collectées via les capteurs répond à plusieurs objectifs : caractériser les niveaux de CO₂ et les dépassements de seuils dans les salles équipées ; évaluer l'impact différencié des capteurs Test et des capteurs Contrôle ; et déterminer l'impact éventuel de facteurs d'influence.

1. Niveaux de CO₂ mesurés et informations sur les dépassements de seuils

Répartition statistique des niveaux mesurés

Les données présentées dans le graphique ci-dessous sont les données fines pour les jours ouvrés, entre 8h00 et 18h00 (et entre 11h00 et 14h00 pour les réfectoires) correspondant à la période de présence potentielle selon les types d'établissements (Crèche, Ecole, Collège) et de salles instrumentés (casse, dortoir, accueil, réfectoire, salle du personnel). Afin de connaître l'échantillon disponible par établir ces paramètres statistiques, le nombre de capteurs disponibles est rappelé (b).

Pour les classes, dortoirs et salles du personnel, 50% des données se situent entre la gamme de concentrations de 700 et 1600 ppm, avec 25% des données situées bien au-delà du seuil recommandé de 800 ppm, avec des teneurs comprises entre 1600 et 3000 ppm. Notamment pour certaines classes en école, des niveaux de CO₂ atypiques ponctuellement supérieurs à 3000 ppm peuvent être observés.

Concernant les réfectoires, les niveaux sont plus faibles, avec 50% des données qui se situent entre 300 et 900 ppm. A noter cependant que 25% des données se situent entre 900 et 1500 ppm. Contrairement aux autres salles, les salles d'accueil et les réfectoires ne présentent pas de niveaux ponctuellement très élevés supérieurs à 2000 ppm.

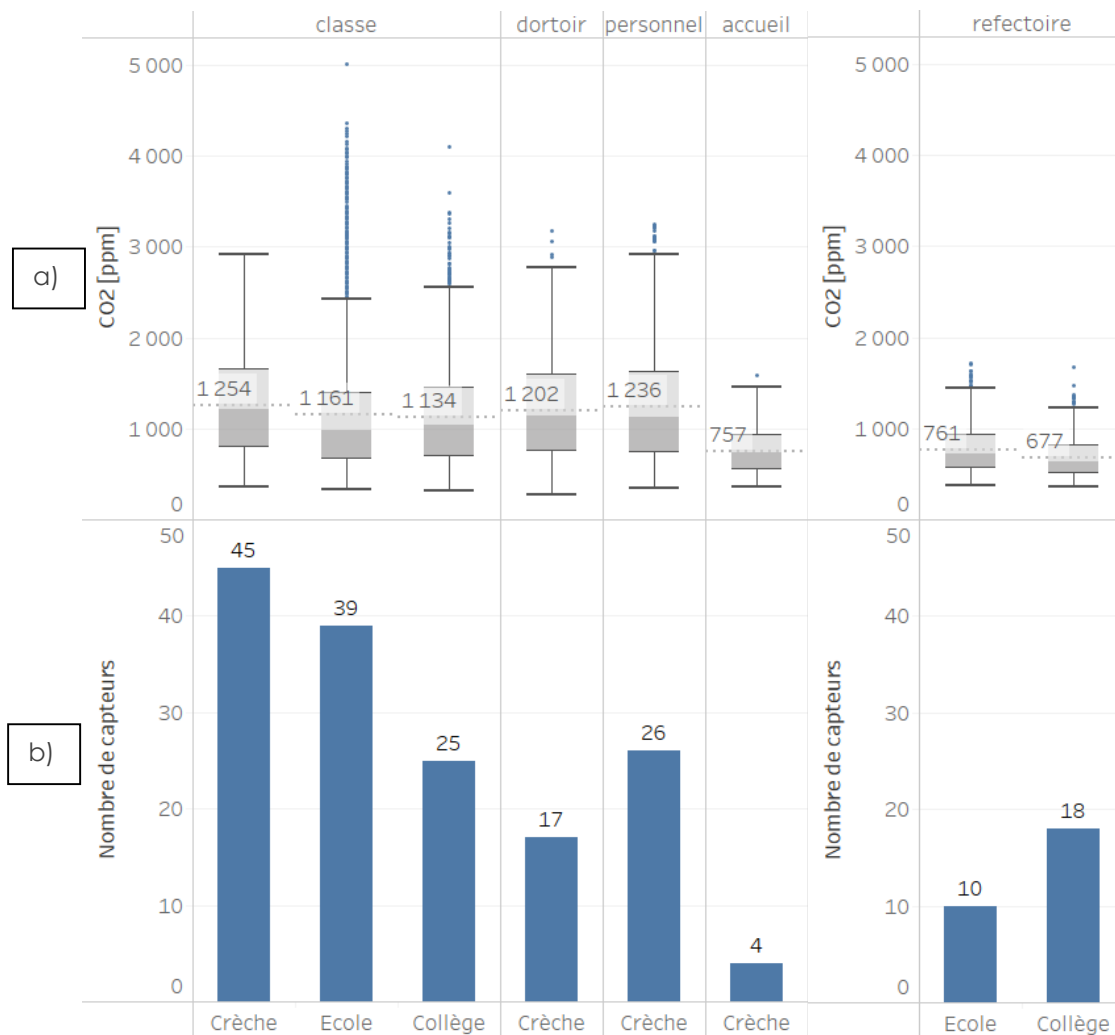


Figure 2 : Niveaux de CO₂ (en ppm) relevés (a) et nombre de capteurs disponibles par type d'établissement et de salle (b)

Indice de confinement

L'indice « ICONE », développé par le CSTB, permet d'évaluer le niveau de confinement d'un espace clos. Les équipes d'Airparif ont adapté cet indice pour l'utiliser dans la présente étude (formule appliquée aux seuils de 800 ppm et 1 000 ppm). Suite à cette adaptation, il est mentionné ici un « indice de confinement » et non l'indice ICONE à proprement parler. L'indice de confinement ainsi établi a été calculé pour chaque capteur sur l'ensemble des jours ouvrés, entre 8h00 et 18h00 (et entre 11h00 et 14h00 pour les réfectoires). L'indice de confinement se situe entre 0 et 5 : le niveau de confinement croît avec l'indicateur. Ainsi, un indice de confinement de « 0 » indique qu'il n'y a pas de confinement au sein de la salle instrumentée, où 100% des concentrations de CO₂ sont inférieures à 800 ppm. A l'inverse, un indice de confinement de « 5 » illustre un confinement extrême avec l'ensemble de teneurs supérieures à 1000 ppm.

NB : Etant donné que les horaires d'occupation de chaque salle n'étaient pas connus, et qu'ils diffèrent entre les types de salle, seules les salles de même type peuvent être comparées entre elles.

L'étude de l'indice de confinement par type de salle et type d'établissement montre qu'en proportion, il y a davantage de classes confinées (indice supérieur ou égal à 3) dans les crèches (34%) que dans les écoles (8%) et les collèges (16%). Concernant les dortoirs des crèches, on retrouve une grande proportion de salles confinées avec 64% des salles où l'indice est supérieur ou égal à 2. Les salles du personnel et les salles d'accueil sont en majorité peu confinées. Enfin concernant les réfectoires, ils sont très peu confinés au sein des Collèges aussi bien en prenant en

compte l'ensemble de la journée (100% avec un indice « 0 ») ou en ciblant uniquement sur la période de présence potentielle entre 11h et 14h00 (83% avec un indice « 0 »). Au sein des écoles, les réfectoires sont plus confinés, avec 30% des réfectoires ayant un indice de 2 ou plus, alors qu'aucun réfectoire de Collège n'enregistre un indice supérieur à 1.

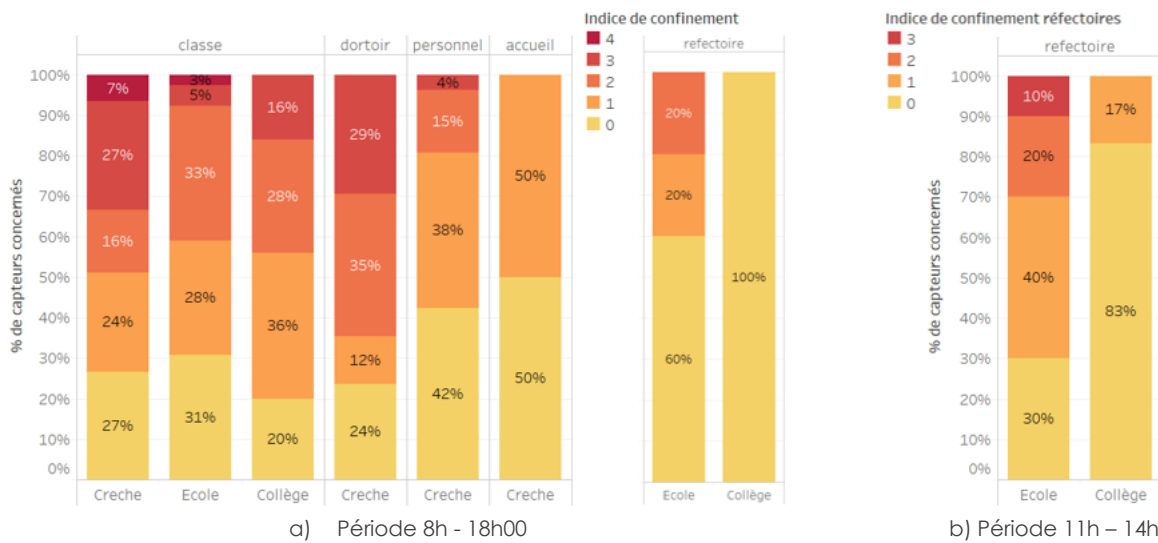


Figure 3 : Distribution des indices de confinement (en %) par type d'établissements et de salles établis sur la période 8h-18h (a) et sur la période 11h-14h au sein des réfectoires (b).

Profils journaliers moyens

Les profils journaliers des concentrations de CO₂ diffèrent en fonction du type de salle. Pour les salles de classe (écoles et collèges), des profils bien marqués sont observés avec des baisses pendant la pause méridienne et les récréations. Pour les salles de classe et les salles d'accueil des crèches, les profils journaliers sont très différents les uns et des autres, sans profil type. Concernant les dortoirs, un profil en cloche est relevé sur l'après-midi, qui correspond aux horaires de sieste. Pour les salles du personnel, on observe une montée des niveaux surtout après la pause méridienne. Enfin, concernant les réfectoires, les profils sont lissés avec peu de dépassements – avec un maximum le midi, et parfois des remontées en fin d'après-midi.



Figure 4 : Profils journaliers moyens par indice de confinement selon les types d'établissement et de salle.

De manière générale, plus l'indice de confinement est fort et plus les profils sont marqués avec une dynamique des teneurs de CO₂ importante illustrant des périodes de confinement. A l'inverse lorsque l'indice est faible, les mesures de CO₂ sont à la fois plus faibles et ne présentent pas d'augmentation marquée au cours de la journée.

Dépassements du seuil de 800 ppm

Le nombre et la durée des dépassements du seuil de 800 ppm ne sont pas liés par une relation linéaire, surtout à partir de 2 dépassements par jour. Globalement, la plupart des salles équipées connaissent autour de 2,5 dépassements par jour, pour une durée de moins de 4 heures. Cependant, il existe quelques cas remarquables, avec des durées de dépassement longues (plus de 6 heures), surtout dans des classes de crèche ; ou des nombres de dépassement importants (plus de 4 par jour), dont en particulier un réfectoire. Le profil du nombre et de la durée de dépassement du seuil de 1000 ppm est globalement similaire.

Différentes configuration de dépassement sont observées. En effet, certaines salles connaissent un nombre important de dépassements, mais leur durée est relativement courte ; à l'inverse, certaines salles présentent des niveaux supérieurs à 800 ppm de manière prolongée, mais avec un nombre de dépassements journaliers plus faible.

Les salles dont le nombre moyen de dépassement par jour est inférieur ou égal à 1 enregistrent des durées de dépassements ponctuels inférieures à 1 heure.

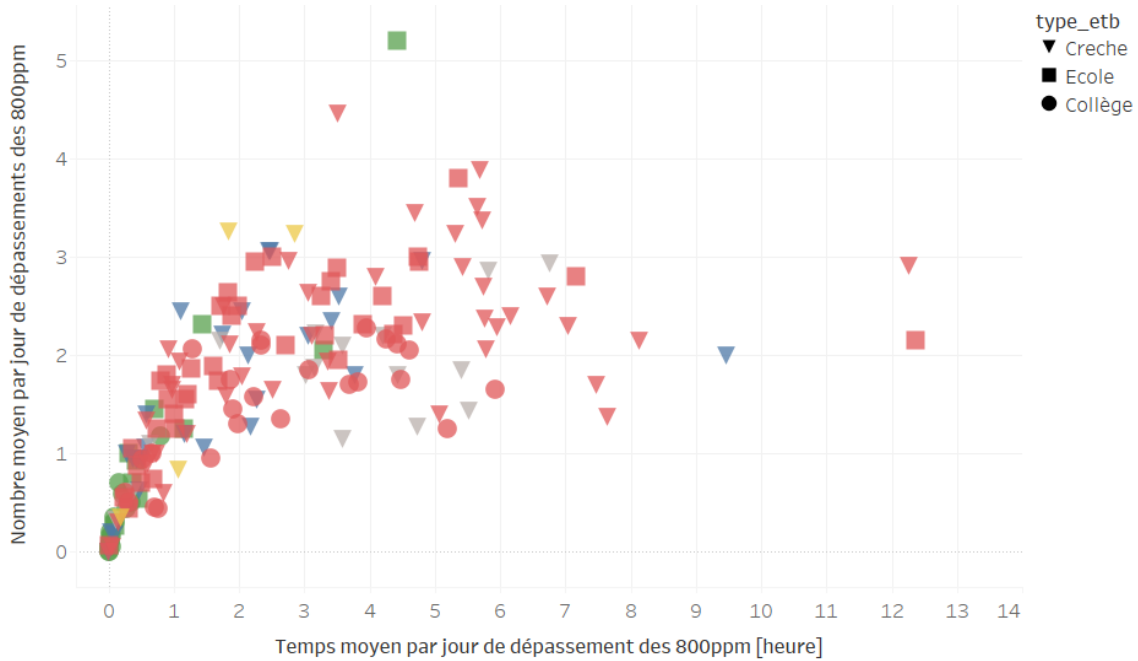


Figure 5 : Temps moyen de dépassement par jour du seuil de 800ppm en fonction du nombre moyen de dépassement par jour au sein des salles instrumentées.

En termes de pourcentage de jours qui ont connu un dépassement du seuil de 800 ppm, pour la plupart des salles on observe que plus de 50% des jours valides de l'étude ont connu au moins un dépassement de seuil. Pour une grande partie des salles, c'est même plus de 80% des jours valides qui ont connu au moins un dépassement. La récurrence des dépassements du seuil de 800 pmm est observée par exemple dans 17 salles au sein de crèches, où au moins un dépassement quotidien est observé. En revanche, une spécificité est notée pour les réfectoires, avec des récurrences de dépassement moindres.

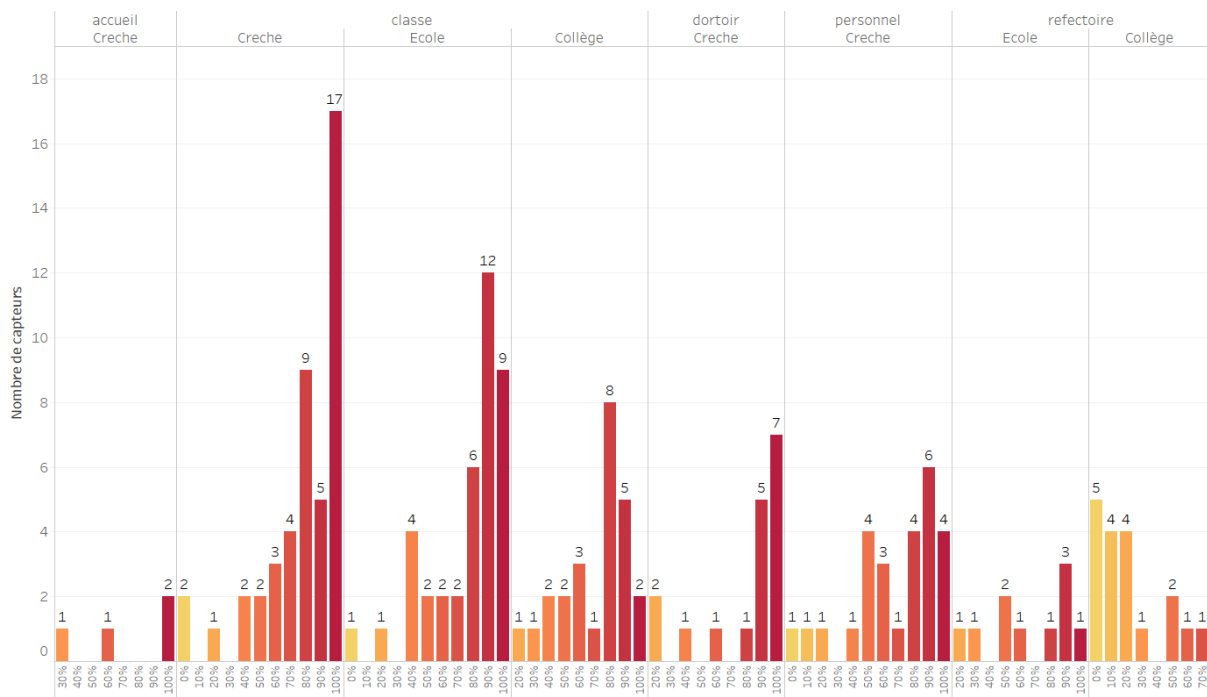


Figure 6 : Classes de pourcentage de jours avec au moins 1 dépassement du seuil de 800 ppm par type d'établissement et de salle.

Baisse des niveaux de CO₂ sans retour sous le seuil de 800 ppm

L'étude de l'occurrence de baisses des niveaux de CO₂ sans retour sous le seuil de 800 ppm permet d'identifier, dans certains cas, des pratiques d'aération insuffisantes pour ramener effectivement les niveaux mesurés sous le seuil recommandé. Dans la plupart des salles, la diminution des niveaux de CO₂ permet bien de passer sous le seuil de 800 ppm, ce qui indique a priori que les pratiques d'aération sont efficaces. En revanche, dans certains cas « atypiques », la diminution des niveaux ne permet pas un retour sous le seuil :

- Dans la salle des grands d'une crèche : 1,25 baisses des niveaux de CO₂ sans retour sous le seuil de 800 ppm (en moyenne par dépassement) ;
- Dans la salle de musique d'une école : 2 baisses des niveaux de CO₂ sans retour sous le seuil de 800 ppm (en moyenne par dépassement) ;
- Dans le dortoir des grands d'une crèche : 2 baisses des niveaux de CO₂ sans retour sous le seuil de 800 ppm (en moyenne par dépassement).

En grande majorité, lorsque les concentrations de CO₂ commencent à diminuer alors qu'elles sont supérieures à 800 ppm, cette baisse se poursuit jusqu'à atteindre des niveaux en deçà du seuil recommandé (cf. Figure 7 : salles dont le nombre moyen de baisse est égal à zéro). Cela montre que les actions d'aération pour diminuer les concentrations lorsque le seuil de 800 ppm est dépassé, sont en majorité efficaces afin de passer sous celui-ci.

NB : un nombre élevé de baisse des niveaux sans retour sous le seuil de 800 ppm peut signifier, entre autres, un temps d'aération insuffisant (comportement des enseignants et personnel éducatif) ; une salle difficile à aérer (nombre d'ouvrants insuffisant, mécanismes de limiteurs d'ouverture) ; une forte dynamique d'entrée et de sortie des occupants de la salle.

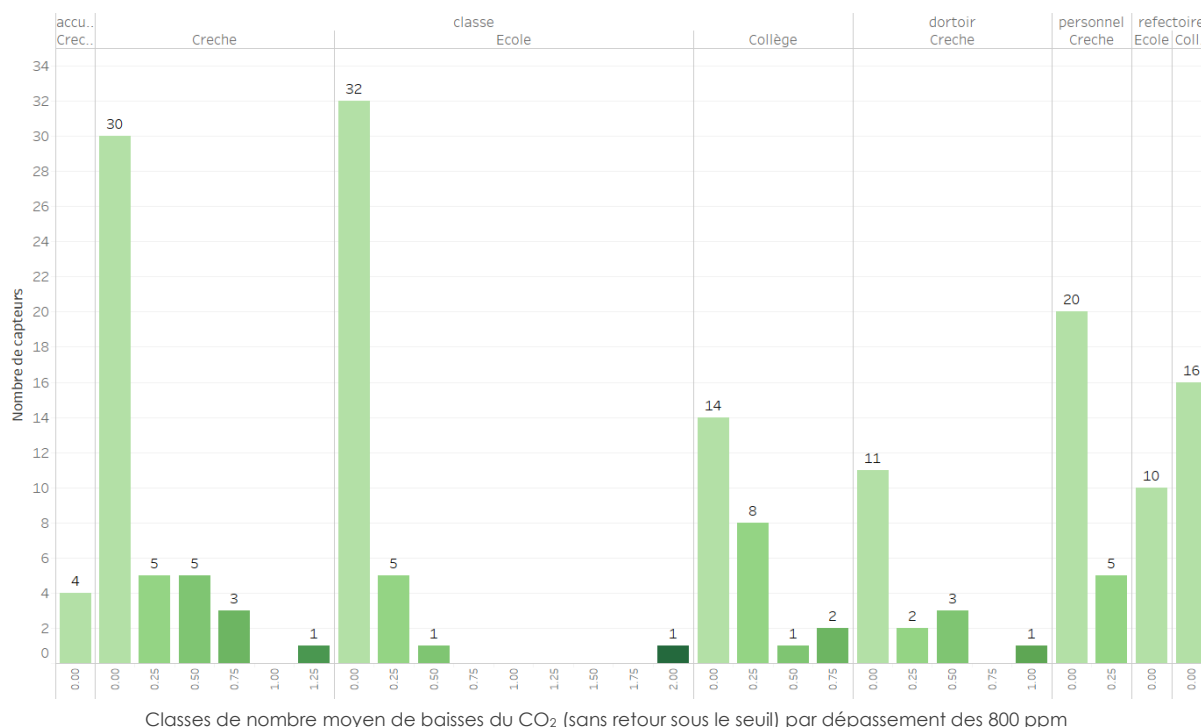


Figure 7 : Nombre moyen de baisses des concentrations de CO₂ sans retour sous le seuil de 800 ppm par type d'établissement et de salle.

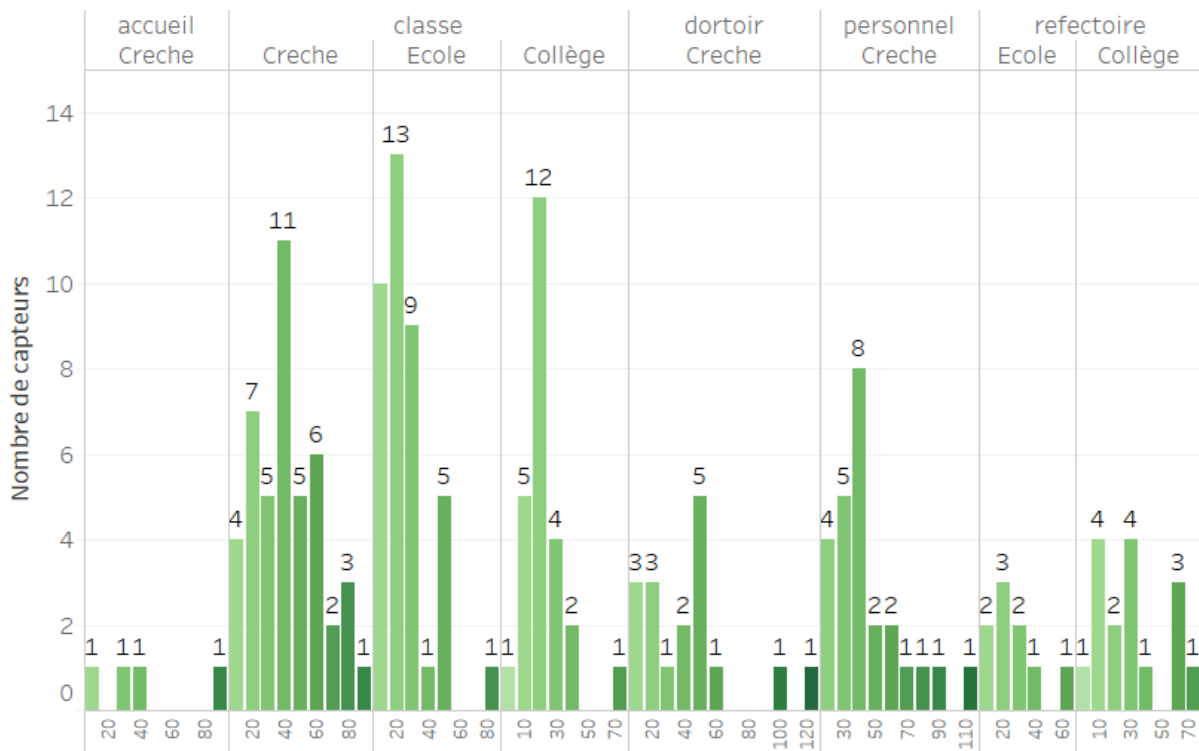
Temps de montée des niveaux de CO₂ jusqu'au dépassement du seuil de 800 ppm

L'étude du temps de montée des niveaux de CO₂ jusqu'au premier dépassement du seuil de 800 ppm permet de tirer des enseignements sur le délai optimal entre l'entrée des occupants dans

la salle et la première aération. Pour les salles de classes, le temps de montée moyen des niveaux de CO₂ est très variable selon la salle. La moyenne est autour de 40-50 minutes pour les crèches, et de 20-30 minutes pour les écoles et les collèges. En ce qui concerne les dortoirs des crèches, le temps de montée varie de 10 minutes à 1 heure.

Deux exceptions sont à noter : le dortoir section moyens d'une crèche, où le temps de montée est supérieur à 2 heures ; et le dortoir section petits d'une crèche, où le temps de montée est de en moyenne 1 heure 50 minutes.

A l'inverse, un temps de montée rapide des concentrations pour atteindre 800 ppm indique un besoin d'aération dès les premières dizaines de minutes après l'arrivée de personnes dans les salles.



Classes de temps moyen de montée des niveaux de CO₂ entre la rentrée dans la salle et le dépassement des 800 ppm (min)

Figure 8 : Temps moyen (en minutes) de montée des niveaux de CO₂ pour atteindre le seuil de 800 ppm par type d'établissement et de salle.

Vitesse de retour sous le seuil de 800 ppm

L'étude de la vitesse de retour sous le seuil de 800 ppm (en ppm/minute) permet de déterminer l'efficacité de l'aération sur les niveaux de CO₂. La vitesse de retour moyenne est située entre 5 et 20 ppm/minute, ce qui signifie qu'une aération de 10 minutes permet de perdre entre 50 et 200 ppm de CO₂. Si l'aération a bien été effectuée au seuil recommandé de 800 ppm, une aération de 10 minutes peut donc permettre de redescendre jusqu'à 600 ppm.

Quelques exceptions de salles qui se « dé-confinent » plus rapidement sont à noter : salle des grands d'une crèche (vitesse de retour de 45 ppm/minute) ; plusieurs salles d'écoles (vitesse de retour de 55 à 65 ppm/minute) ; et une salle d'école (vitesse de retour de 65 ppm/minute). Cela indique une bonne aération avec des gains rapides et importants.

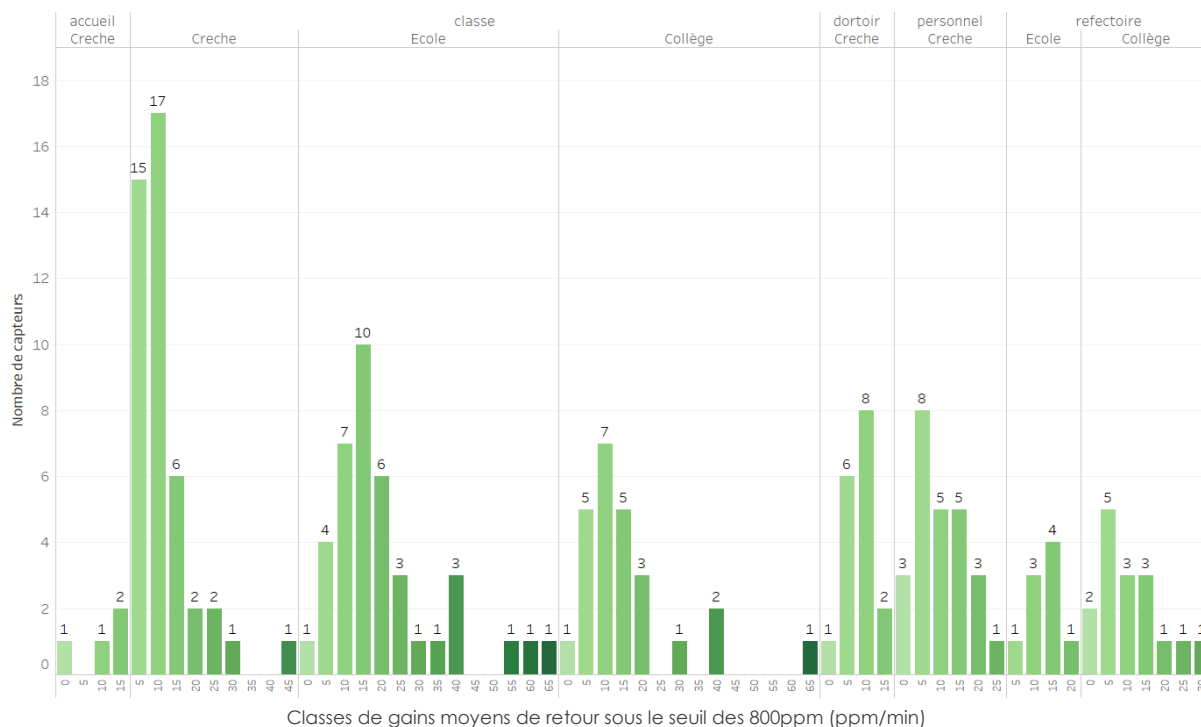


Figure 9 : Gains moyens de retour sous le seuil de 800 ppm en ppm/min par type d'établissement et de salle.

Quelques cas particuliers de niveaux très élevés, ou de temps de retour sous le seuil de 800 ppm anormalement longs, ont été identifiés.

2. Evaluation de l'impact des capteurs Test vs capteurs Contrôle

Un des objectifs de la présente étude est de distinguer l'impact des capteurs avec affichage visible (capteurs Test) de l'impact des capteurs avec affichage masqué (capteurs Contrôle) sur les niveaux de CO₂. La question est en effet de savoir si les changements de comportements d'aération sont influencés par l'accès à une information précise avec un signal quand l'aération devient nécessaire (voyant lumineux orange ou rouge en cas de dépassement des seuils) ; ou bien si un simple rappel de l'importance de l'aération et de son efficacité dans la lutte contre la propagation du SARS-CoV-2 est suffisante (cf. infra résultats de l'étude comportementale).

L'analyse des données a permis d'identifier, dans certains cas, des différences entre les salles équipées de capteurs Test et les salles équipées de capteurs Contrôle. Cependant, étant donné l'échantillon de capteurs Contrôle très limité (seulement 26 installés au total pour 18 valides), les enseignements tirés de cette analyse doivent être interprétés avec précaution.

Comme le montre la Figure 10 sur l'indice de confinement par type d'établissement, dans les écoles, un niveau de confinement potentiellement moins important dans les salles équipées de capteurs Test que dans celles équipées de capteurs Contrôle est observé. En effet, 34% des salles équipées de capteurs Test ont un indice de confinement supérieur ou égal à 2, contre 71% des salles équipées de capteurs Contrôle (pour rappel dans les écoles, l'échantillon était constitué de 42 capteurs Test et de 7 capteurs Contrôle).

En ce qui concerne les collèges, aucune différence nette n'émerge entre les salles équipées de capteurs Test et celles équipées de capteurs Contrôle, les indices de confinement étant globalement identiques dans les deux cas (pour rappel dans les collèges, l'échantillon était de 16 capteurs Test et de 9 capteurs Contrôle). Cette absence d'impact différencié entre les capteurs Test et les capteurs Contrôle pourrait être le signe d'une moindre appropriation du capteur par les enseignants, qui au collège changent fréquemment de salle, contrairement aux enseignants des

écoles qui ont une salle attitrée et de ce fait pourraient avoir davantage intégré le capteur et l'information diffusée dans leurs pratiques d'aération, avec un impact positif sur les niveaux de CO₂. Cependant, étant donné le faible échantillon d'analyse, des études complémentaires avec un échantillon plus complet seraient nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Enfin, concernant les crèches, le nombre de capteurs Contrôle (2) est trop faible pour tirer des conclusions sur l'impact différencié des capteurs Test et des capteurs Contrôle.

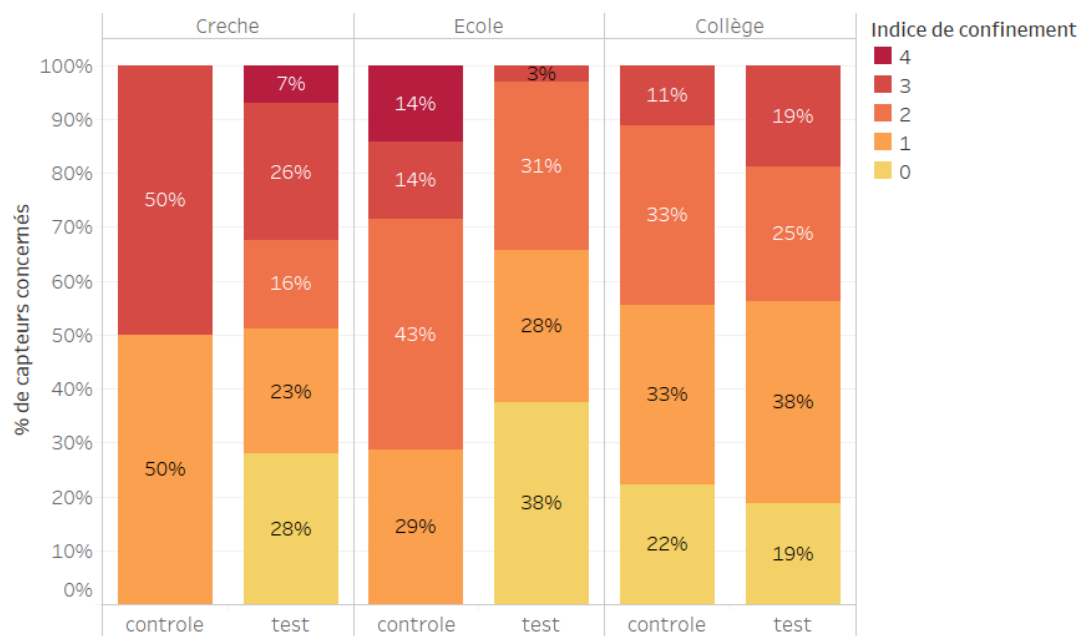


Figure 10 : Différence d'indice de confinement selon les salles instrumentées d'un capteur « Contrôle » ou « Test » selon le type d'établissement.

Concernant les paramètres de dépassement (nombre et durée, vitesse de montée, vitesse de retour), des tests statistiques d'égalité des moyennes ont été réalisés, agrégés à la journée (1 observation = 1 appareil, 1 jour).

Pour les crèches, il n'y a pas de différences significatives entre les paramètres de dépassement, le nombre d'observations pour les capteurs Contrôle étant trop réduit.

Pour les écoles, des différences significatives sont observées pour la plupart des paramètres : le temps de dépassement par jour est moins long pour les salles équipées de capteurs Test ; le temps de montée des niveaux est plus long pour les salles équipées de capteurs Test ; enfin, lors d'un dépassement du seuil dans une salle équipée d'un capteur Test, les niveaux maximum de CO₂ sont moins élevés. Ces résultats pointent vers une certaine efficacité des capteurs avec un affichage visible pour accompagner les pratiques d'aération des enseignants et du personnel éducatif, avec des durées de dépassement plus courtes, des temps de montée au-delà du seuil plus longs, et des niveaux plus faibles même en cas de dépassement.

Enfin, concernant les collèges, il n'y a pas de différences significatives entre les paramètres de dépassement, l'analyse des données n'ayant pas permis d'identifier un impact visible des capteurs Test. Là encore se pose la question de l'appropriation des capteurs dans les salles de collège, où une même salle est occupée par plusieurs enseignants (cf. supra).

3. Analyse de certains facteurs d'influence

Initialement, il était proposé d'analyser l'impact d'un certain nombre de facteurs d'influence sur les pratiques d'aération : surface/volume de la salle, nombre d'ouvrants, nombre d'occupants, conditions météorologiques (température et pluviométrie), type de ventilation. Cependant, au regard des difficultés rencontrées à collecter ces données, l'analyse des facteurs d'influence s'est limitée à la température ambiante (tous les établissements) et à la présence ou non d'une Centrale de Traitement de l'Air (information disponible uniquement pour les crèches).

Température ambiante

Le froid constituant a priori un frein à l'aération (cf. infra Etude comportementale), un croisement de la durée par jour de dépassements du seuil de 800 ppm avec la température ambiante a été réalisé, afin de déterminer si la température ambiante a un impact sur les pratiques d'aération.

Dans les crèches (dortoirs, salles du personnel, salles de classe) et dans les collèges (salle de classe), on observe effectivement une durée de dépassement plus réduite à mesure que la température augmente (en particulier à partir de 25°C). Les résultats sont similaires pour les réfectoires (écoles et collèges). En revanche, les résultats sont moins nets pour les salles de classe des écoles, pour lesquelles des températures plus élevées n'ont pas d'effet visible sur les durées de dépassement.

Ces premiers résultats semblent indiquer que la température ambiante a bien un impact sur les pratiques d'aération, avec un nombre d'ouverture de fenêtre sans doute plus élevé à mesure que les températures augmentent. Cependant, ces résultats seront à consolider, avec plus de capteurs mais aussi une période de mesure plus longue et avec plus de variabilité en termes de température ambiante.

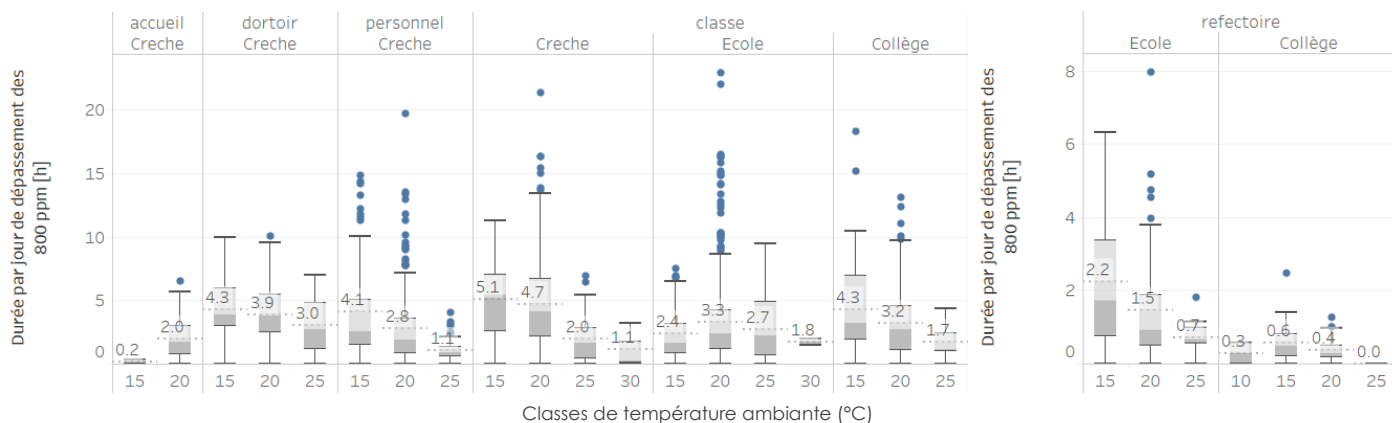


Figure 11 : Durée de dépassement du seuil de 800 ppm (en heure) selon la température ambiante à l'échelle de la journée par type d'établissement et de salle.

Présence d'une Centrale de Traitement de l'Air (CTA)

L'information sur la présence ou non d'une Centrale de Traitement de l'Air (CTA) est disponible pour les crèches uniquement, soit 47 établissements. De tous les paramètres disponibles pour les crèches, c'est le seul qui semble avoir un impact visible sur les niveaux de concentrations de CO₂. Ainsi, pour les salles accueillant les enfants, le niveau médian est de 1187 ppm sans CTA, et de 849 ppm avec CTA ; pour les dortoirs, le niveau médian est de 1141 ppm sans CTA, et de 828 avec CTA. En revanche, pour les salles du personnel, l'effet observé est inverse (niveaux plus élevés avec CTA que sans CTA), mais cela est dû à la fois au faible échantillon statistique (6 salles sans CTA et 4 avec CTA) et à une salle dont les niveaux sont élevés malgré la présence d'une CTA (indice de confinement de 3 contre indice « 0 » pour les 3 autres équipées également d'une CTA).

Après croisement entre les paramètres de dépassement (nombre et durée, vitesse de montée, vitesse de retour) et la présence ou non d'une CTA, des différences significatives sont visibles. Ainsi dans les salles équipées d'une CTA, la durée et le nombre de dépassement sont plus faibles que dans les salles sans CTA, et la montée des niveaux de CO₂ est plus lente. Il est observé en moyenne 2.5 dépassements du seuil de 800 ppm pour les salles non équipées, contre 1.6 dépassement pour celles disposant d'une CTA.

L'impact de la présence d'une CTA est illustré dans le graphique ci-dessous, qui indique l'indice de confinement par type de salle. Cet impact est visible, notamment pour les classes et les dortoirs :

- aucun indice de confinement supérieur ou égal à 3 pour les classes équipées d'une CTA, contre 60% sans CTA ;
- 20% des dortoirs équipés d'une CTA dont l'indice de confinement est égal à 3, contre 100% sans CTA.

A nouveau, ces enseignements sont à prendre avec précaution à cause du faible échantillon disponible.

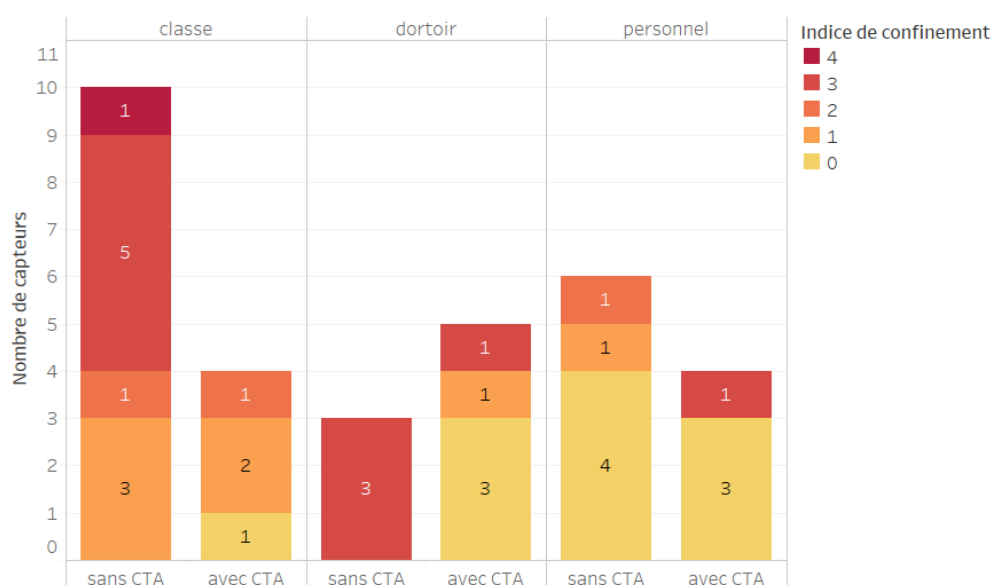


Figure 12 : indice de confinement selon l'échantillon de salles équipées ou non d'une CTA.

2. Synthèse de l'étude comportementale

1. Méthodologie

Deux groupes expérimentaux ont été constitués pour distinguer l'effet de l'utilisation du capteur du simple effet de la participation à une expérimentation sur l'incitation à l'aération. Le groupe contrôle a été équipé de capteurs sans affichage visible indiquant le taux de CO₂ (capteurs Contrôle), alors que le groupe test a reçu des capteurs avec affichage visible (voyant rouge au-delà de 1000ppm de CO₂, orange entre 800 et 1000 ppm et vert en dessous) (capteurs Test).

En parallèle d'une analyse des données des capteurs de CO₂ pilotée par Airparif, une étude comportementale a été conduite pour déterminer si la présence et l'utilisation de ces capteurs conduit bien à une amélioration des pratiques d'aération. Cette étude repose sur des entretiens et des observations réalisées au sein d'établissements équipés, ainsi que sur deux questionnaires permettant de caractériser les pratiques d'aération au début et à la fin du projet. L'objectif était de pouvoir comparer les réponses des participants entre le début et la fin du projet afin de mettre

en évidence une éventuelle évolution due à la présence des capteurs. Cependant, la faible participation aux questionnaires, notamment au second, a limité les possibilités de comparaison. De plus, seul un participant du groupe contrôle a complété les deux questionnaires. Par conséquent, la comparaison des évolutions de comportements entre les groupes test et contrôle n'est pas possible.

2. Synthèse des résultats des questionnaires

Résultats du questionnaire initial

Le premier questionnaire a été complété par 166 participants, principalement des enseignants (42,2%), des personnels de la petite enfance (17,5%) et des personnels de direction (25,9%). Les établissements représentés dans ces réponses sont principalement des collèges (41,0%) et des crèches (30,7%), puis des écoles élémentaires (13,3%) et des écoles maternelles (15,1%).

Concernant leurs pratiques en termes d'aération, au début du projet, les participants ont l'habitude d'ouvrir la fenêtre en arrivant dans leur salle (pour 78,4%). Ils ouvrent fenêtres et portes principalement pour renouveler l'air et lutter contre le Covid-19. Le froid et le bruit constituent les principaux freins à l'ouverture et sont également les principales raisons de fermeture des fenêtres et portes. L'ouverture de la porte est perçue comme assez efficace, mais seulement en complément d'une fenêtre (score moyen d'efficacité perçue de 3,7 sur une échelle en 5 points).

En ce qui concerne leur évaluation de l'aération, les participants estiment aérer plutôt fréquemment leur salle (score moyen de fréquence perçue de 7,8 sur une échelle en 10 points), et un tiers d'entre eux déclarent même laisser une fenêtre ouverte en permanence. L'aération des salles est perçue comme très importante par une grande majorité des participants (74,7%, score moyen d'importance de 9,6 sur une échelle en 10 points) et comme très utile pour lutter contre le Covid-19 (score moyen d'utilité perçue de 9,4 sur une échelle en 10 points). Ils estiment également être plutôt très réguliers dans leur aération (score moyen de régularité perçue de 8,6 sur une échelle en 10 points) et trouvent l'aération plutôt facile dans l'ensemble (score moyen de facilité perçue de 7,9 sur une échelle en 10 points). Les difficultés perçues correspondent souvent aux conditions extérieures (bruit et intempéries), ainsi qu'aux problèmes matériels (fenêtres qui ne s'ouvrent pas ou peu...). Les participants estiment aérer suffisamment leur salle (score moyen de suffisance perçue de 7,5 sur une échelle en 10 points), et 19,3% estiment même aérer plus que nécessaire.

Résultats du questionnaire final

Le second questionnaire a été complété par 48 participants, principalement issus de crèches (78,6%).

Concernant les pratiques d'aération à la fin du projet, les participants sont toujours une majorité à ouvrir la fenêtre en arrivant dans leur salle (83,3%). Les deux raisons principales d'ouverture des fenêtres sont toujours le renouvellement de l'air et la lutte contre le Covid-19, mais la chaleur dans la salle devient la seconde raison en termes de proportion de participants pour l'ouverture de la porte. Le froid et le bruit constituent toujours les premiers freins à l'ouverture, mais c'est le froid et les intempéries qui poussent le plus les participants à refermer la fenêtre. Concernant la fermeture de la porte, la raison principale est toujours le froid, mais suivi par la sortie de la salle. L'ouverture de la porte est perçue comme légèrement efficace, et cela seulement en complément d'une fenêtre (score moyen d'efficacité perçue de 3,2 sur une échelle en 5 points).

A propos de leur évaluation de l'aération, les participants estiment aérer très fréquemment leur salle (score moyen de fréquence perçue de 8,5 sur une échelle en 10 points), et presque la moitié d'entre eux déclarent même laisser une fenêtre ouverte en permanence (47,9%). L'aération des salles est toujours perçue comme très importante par une grande majorité des participants (70,8%, score moyen d'importance de 9,4 sur une échelle en 10 points) et comme très utile pour lutter contre le Covid-19 (score moyen d'utilité perçue de 9,3 sur une échelle en 10 points). Ils estiment également toujours être plutôt très réguliers dans leur aération (score moyen de régularité perçue de 8,7 sur une échelle en 10 points) et trouvent l'aération plutôt facile (score moyen de facilité perçue de 7,5 sur une échelle en 10 points). Les difficultés perçues correspondent souvent aux problèmes matériels (fenêtres qui ne s'ouvrent pas ou peu...) et aux raisons de sécurité. Les participants estiment toujours aérer suffisamment leur salle (score moyen de suffisance perçue de 8,0 sur une échelle en 10 points), et un tiers des participants estiment même aérer plus que nécessaire.

Pour le second questionnaire, 46 participants sont équipés d'un capteur test avec des voyants lumineux fonctionnels et ont donc pu rapporter leur utilisation et leurs opinions sur ces capteurs. Une grande majorité de ces participants déclarent avoir utilisé plutôt fréquemment leur capteur (score moyen d'utilisation de 7,4 sur une échelle en 11 points). Ils ont trouvé ces capteurs très faciles à consulter (score moyen de facilité de 9,0 sur une échelle en 10 points) et plutôt utiles pour les aider à aérer (score moyen d'utilité perçue de 7,9 sur une échelle en 10 points). Le capteur ne semble pas représenter une contrainte pour les participants (score moyen de contrainte perçue de 2,7 sur une échelle en 10 points), la moitié déclarant ne pas le trouvé contraignant du tout. Ceux qui le trouvent contraignants ont relevé des aspects liés à l'installation du capteur (mal fixé ou peu visible) ou encore le fait que les voyants soient souvent rouges malgré les aérations.

Ces capteurs semblent avoir été efficaces pour guider l'aération car une grande majorité des participants ont déclarés ouvrir à chaque fois que le voyant passait à l'orange (67,4%) et encore plus lorsqu'il passait au rouge (77,8%). Très peu ont d'ailleurs déclaré refermer lorsque le voyant redescendait du rouge à l'orange (seulement 22,5% ont refermé occasionnellement ou systématiquement à cette occasion). Le fait que le voyant redescende de l'orange au vert n'implique pas que les participants referment immédiatement, puisque près de la moitié des participants ne le font jamais à cette occasion (47,5%). Le capteur est donc utilisé comme signal d'ouverture mais ne semble pas être le seul paramètre pris en compte pour la fermeture. Plus de la moitié des participants déclarent avoir changé leur manière d'aérer depuis l'installation du capteur (56,5%), et cela principalement en ouvrant plus souvent ou en ouvrant plusieurs fenêtres et/ou portes simultanément.

Concernant le souhait de garder les capteurs, une grande majorité des participants déclarent vouloir les conserver (87,0%). Parmi eux, la plupart estime qu'il est nécessaire de conserver le capteur en permanence dans la salle pour pouvoir le consulter régulièrement. Ceux qui ne souhaitent pas garder le capteur sont également ceux qui jugent l'aération des salles et les capteurs les moins utiles.

Evolution des résultats entre le début et la fin du projet

Parmi tous les participants, 35 ont complété les deux questionnaires permettant ainsi de comparer leurs réponses entre le début et la fin du projet. Ces participants proviennent majoritairement de crèches (79,4%) et sont quasiment tous équipés d'un capteur test (sauf 1 qui a donc été écarté des analyses). Quelques évolutions en termes de pratiques d'aération ressortent suite à l'utilisation des capteurs. Tout d'abord, les participants ont davantage tendance à ouvrir la fenêtre lorsqu'ils passent devant. Le fait d'estimer l'aération de la salle suffisante les incite moins à fermer la fenêtre. Ils sont également plus nombreux à laisser une porte ouverte en permanence. Quant à l'évaluation

de leur pratique, à la fin du projet, les participants estiment aérer encore plus fréquemment, et d'une façon encore plus suffisante leur salle.

Conclusion

Pour conclure, l'aération des salles accueillant des enfants était déjà une préoccupation importante des personnels au début du projet. La plupart, estimaient ainsi aérer régulièrement et suffisamment leur salle. Toutefois, l'installation des capteurs de CO₂ a pu indiquer que leurs habitudes d'aération n'étaient pas forcément toujours adaptées ou suffisantes. Les capteurs ont alors permis de guider les comportements, les participants se servant beaucoup des voyants lumineux pour déterminer quand ouvrir la fenêtre. Ils ont aussi pu se rendre compte qu'il pouvait être nécessaire d'aérer différemment, en ouvrant les fenêtres en plus grand plutôt qu'en laissant entre-ouvert en permanence ou encore en ouvrant plusieurs fenêtres et/ou portes en même temps par exemple. Les participants équipés de capteurs tests estiment ainsi avoir aéré encore plus fréquemment leur salle. Ils souhaitent en grande majorité conserver le capteur dans leur salle, et cela en permanence pour pouvoir le consulter régulièrement.

3. Synthèse des enseignements des entretiens et retours qualitatifs

- La plupart des personnes interrogées voient l'utilité du capteur et sont favorables à en avoir et à en faire usage.
- Toutes ou presque dénotent spontanément l'idée que les capteurs mettent en place une réponse « automatique » d'aération dès que l'on voit le signal orange ou rouge, ceci du moins dans le contexte de températures clémentes. Tous ne rapportent pas pour autant y prêter une grande attention, même si la majorité y jette régulièrement un œil. Il y a là un enjeu de bonne localisation, il faut pouvoir le voir naturellement sans devoir le chercher.
- Il est intéressant de noter que le capteur s'insère dans une dynamique sociale quand des groupes y sont confrontés (par exemple un groupe d'enseignants en salle de pause à midi). Il fait évoluer les échanges, qui existaient déjà entre les personnes demandeuses d'aération et celles qui s'y opposent (à cause du bruit extérieur souvent), le rapport de force et par suite la fréquence d'aération (et d'exposition au bruit sans doute).
- La quasi-totalité des participants évoquent leur surprise face à la rapidité avec laquelle le capteur passe à l'orange ou au rouge, et inversement face à la longue durée d'aération nécessaire pour revenir au vert (s'il repasse au vert). Ils en retirent généralement un nouveau référentiel de durée d'aération « normale », qui semble devoir se prolonger dans la durée. Il nous semble voir ici que les croyances « naïves » sur l'aération sont le premier frein à une bonne pratique, c'est bien le constat objectif et répété des durées qui fait vraiment changer cette croyance, probablement bien plus qu'un argumentaire exclusivement explicatif n'y parviendrait. La question de la pérennité de la nouvelle croyance reste cependant à investiguer.
- Il est fréquent que ces longues durées pour revenir au vert ait été l'occasion de remettre aussi en question la façon d'aérer. Les options permettant de générer des courants d'air ont généralement été testées et, les meilleures retenues pour faire évoluer les pratiques (faire classe avec porte ouverte par défaut par exemple). Certains ont bien sûr aussi constaté qu'ils ne pouvaient pas améliorer les choses.
- Se pose d'ailleurs nettement dans ces entretiens le problème de l'échec à revenir à un taux de CO₂ acceptable. Un nombre conséquent de personnes interrogées rapportent être

dans des situations où elles ne parviennent pas à aérer suffisamment (faute d'ouvrants assez grands, de dynamique de courants d'air ou à cause du bruit notamment). Cela pose plusieurs problèmes.

- Premièrement, cette situation est génératrice d'angoisse, le constat est fait que la qualité de l'air est problématique, mais rien ne permet d'y remédier, pour les élèves comme pour les enseignants.
 - Deuxièmement, cela déconstruit l'influence du capteur, qu'il faut alors s'efforcer d'ignorer pour ne pas alimenter l'angoisse et le sentiment d'impuissance.
 - Les participants semblent être preneurs d'une intervention de la Ville à ce sujet, qui en tant qu'installatrice des capteurs est perçue comme « responsable » du problème.
 - Ces réactions pointent vers un vrai besoin d'accompagnement et de pédagogie sur les capteurs mais aussi plus globalement sur la question de la mesure du CO₂ en air intérieur et des risques de transmission du SARS-CoV-2. La solution serait de permettre aux personnes concernées de trouver un accompagnement, un interlocuteur ou au moins une page d'informations sur la conduite à tenir pour ne pas rester prisonnier de cette situation problématique. A minima un lien internet ou un court texte d'information pourrait être apposé sur le capteur lui-même et ainsi être disponible même hors des canaux d'information prévus. En outre, la couleur rouge pour le seuil de 1000 ppm nous paraît devoir être changée pour un signal moins anxiogène.
- Les enfants, sauf quand ils sont très petits, sont naturellement très intéressés par l'objet et se l'approprient bien, surtout pour signaler l'état orange ou rouge et ouvrir les fenêtres. Les enseignants signalent aussi pour la plupart que le capteur a été l'occasion d'échanges fructueux et propices à sensibiliser aux enjeux de qualité de l'air et d'aération.
 - La compréhension sur le fond n'est pas systématique et encore moins le lien avec le Covid, l'idée qu'il s'agit de mesure du CO₂ est souvent identifiée cependant et tous ont bien compris qu'il s'agissait de signaler quand aérer.
 - La question de la fiabilité de l'information, soit au plan de sa fiabilité objective soit de la capacité de l'individu à faire confiance à l'interprétation qu'il en fait, n'est évoquée qu'une fois explicitement, ce qui semble montrer en creux que le sujet n'est pas vraiment saillant, par contre, il se pose pour ceux qui sont confrontés au voyant rouge en permanence et doivent trouver une manière de s'en détacher.
 - Les quelques personnes confrontées à des capteurs contrôlé (dont les voyants étaient éteints) ont toutes rapportées l'avoir oublié assez rapidement.

3. Conclusions de l'expérimentation

1. Niveaux de CO₂ dans les établissements scolaires

L'analyse des données collectées a permis de caractériser les niveaux de CO₂ moyens dans les salles, ainsi que d'identifier quelques établissements potentiellement problématiques en termes de confinement.

Les niveaux de CO₂ dans les salles (classes, dortoirs, salles du personnels) sont globalement situés entre 700 et 1600 ppm (50% des données). Il convient cependant de noter que 25% des données se situent à des niveaux bien au-delà du seuil recommandé de 800 ppm, entre 1600 et 3000 ppm.

Les niveaux relevés sont plus faibles dans les réfectoires (50% des données situées entre 300 et 900 ppm), ce qui constitue une bonne nouvelle étant donné les risques accrus de contamination dans les lieux clos où les occupants ne portent pas le masque.

En ce qui concerne l'indice de confinement (indice ICONÉ adapté dans le cadre de cette étude), il faut retenir que les crèches sont globalement plus confinées que les écoles et les collèges : 34% des salles équipées dans des crèches ont un indice de confinement supérieur ou égal à 3, contre 8% pour les écoles et 16% pour les collèges.

Concernant les paramètres de dépassement, une observation détaillée a permis une meilleure compréhension du phénomène de confinement :

- **Nombre et durée de dépassements** : les dépassements du seuil recommandé de 800 ppm sont fréquents et concernent la majorité des salles. Ainsi, environ 80% des salles ont enregistré au moins un dépassement un jour sur deux (50% des jours ouvrés), et environ 60% des salles ont connu des dépassements pour plus de 80% des jours. Concernant la durée des dépassements, elle est très variable, allant de quelques minutes à plusieurs heures pour certains établissements.
- **Temps de montée au-delà du seuil** : le temps de montée moyen des niveaux de CO₂ au-delà du seuil de 800 ppm est très variable selon les salles. La moyenne se situe autour de 40-50 minutes pour les crèches, et autour de 20-30 minutes pour les écoles et les collèges. À noter que pour les dortoirs, on observe des variations allant de 10 minutes à plus de 2 heures.
- **Vitesse du retour sous le seuil** : la vitesse de retour sous le seuil de 800 ppm est comprise entre 5 et 20 ppm/minute. Cela signifie qu'une aération de 10 minutes permet de perdre entre 50 et 200 ppm de CO₂. Si l'aération a bien été effectuée au seuil recommandé de 800 ppm, une aération de 10 minutes peut donc permettre de redescendre les niveaux entre 750 et 600 ppm.
- **Baisse des niveaux sans retour sous le seuil** : pour la plupart des salles, la baisse des niveaux de CO₂ est généralement suffisante pour permettre de repasser sous le seuil de 800 ppm, ce qui indique a priori des pratiques d'aération efficaces. Cependant, certains cas ont été identifiés (en particulier dans des crèches) pour lesquels la baisse est insuffisante pour permettre un retour sous le seuil recommandé. Ceci peut s'expliquer par des pratiques d'aération inadéquates, mais aussi par une salle difficile à aérer (nombre d'ouvrants insuffisants, limitateurs d'ouverture), ou encore une forte dynamique d'entrée et de sortie des occupants de la salle.

2. Impact de la présence des capteurs sur les pratiques d'aération

L'analyse des données a permis d'identifier, dans certains cas, des différences entre les salles équipées de capteurs Test et les salles équipées de capteurs Contrôle. Cependant, étant donné l'échantillon de capteurs Contrôle très limité (seulement 26 installés au total pour 18 dont les données sont valides), les enseignements tirés de cette analyse doivent être interprétés avec précaution.

- **Crèches** : le nombre de capteurs Contrôle (2) est trop faible pour tirer des conclusions sur l'impact différencié des capteurs Test et des capteurs Contrôle.
- **Ecoles** : on observe dans les écoles un niveau de confinement moins important dans les salles équipées de capteurs Test que dans celles équipées de capteurs Contrôle (34% des salles équipées de capteurs Test ont un indice de confinement supérieur ou égal à 2, contre

71% des salles équipées de capteurs Contrôle) ; pour rappel dans les écoles, l'échantillon était constitué de 42 capteurs Test et de 7 capteurs Contrôle. Ces résultats pointent vers un vrai impact du capteur (avec affichage visible) sur les pratiques d'aération des enseignants et personnel éducatifs, et gagneraient à être consolidés en phase 2 avec un échantillon statistique plus significatif (en particulier pour les capteurs Contrôle).

- **Collèges** : En ce qui concerne les collèges, aucune différence nette n'émerge entre les salles équipées de capteurs Test et celles équipées de capteurs Contrôle, les indices de confinement étant globalement identiques dans les deux cas (pour rappel dans les collèges, l'échantillon était de 16 capteurs Test et de 9 capteurs Contrôle). Cette absence d'impact différencié entre les capteurs Test et les capteurs Contrôle pourrait être le signe d'une moindre appropriation du capteur par les enseignants, qui au collège changent fréquemment de salle, contrairement aux enseignants des écoles qui ont une salle attitrée et de ce fait pourraient avoir davantage intégré le capteur et l'information diffusée dans leurs pratiques d'aération, avec un impact positif sur les niveaux de CO₂.

L'analyse des questionnaires dans le cadre de l'étude comportementale tend également à confirmer cet impact positif du capteur sur les pratiques d'aération. Ainsi, à la fin du projet, on note une légère augmentation de la fréquence perçue de l'aération (8,5 sur 10 en moyenne dans le questionnaire final contre 7,8/10 en moyenne dans le questionnaire initial).

Le capteur semble constituer une vraie aide à l'aération : à la fin du projet 68% des participants déclarent aérer dès que le voyant passe à l'orange (seuil de 800 ppm), et 78% dès que le voyant passe au rouge (seuil de 1000 ppm). Plus de la moitié des participants déclarent avoir changé leurs pratiques d'aération depuis l'installation du capteur, face au constat que le dépassement du seuil recommandé arrivait plus rapidement qu'ils ne l'auraient pensé, et que le temps nécessaire pour redescendre sous ce seuil avec l'aération était également plus long qu'ils ne l'imaginaient. Ainsi, la présence du capteur (avec affichage visible) a sans doute permis à de nombreux participants de remettre en cause leurs croyances « naïves » sur les niveaux de CO₂ dans leur salle, grâce aux observations directes permises par le capteur. La présence du capteur semble donc avoir effectivement permis d'influer sur les pratiques d'aération des participants, avec des aérations plus fréquentes mais aussi plus efficaces (par exemple en ouvrant simultanément plusieurs ouvrants pour créer un courant d'air).

Enfin, les participants dans leur grande majorité sont très satisfaits de la présence du capteur, qui est perçu comme une aide utile et non comme une contrainte. Ainsi 87% des participants indiquent en fin d'expérimentation souhaiter conserver le capteur, qu'ils jugent indispensable pour guider leurs pratiques d'aération. Cet attachement est un point à creuser, en particulier pour déterminer la période de présence du capteur (affichage visible) nécessaire pour entraîner des changements de comportements pérennes, même en face de nouveaux obstacles (nuisances sonores ou températures hivernales, par exemple). Ce point gagnerait à être approfondi en phase 2 (cf. infra).

3. Impact des paramètres d'influence sur les niveaux de CO₂

L'analyse de l'impact de certains paramètres d'influence a permis de mettre en évidence dans certains cas un impact visible sur les niveaux de CO₂.

- **Température extérieure** : Dans les crèches et dans les collèges, on observe une durée de dépassement du seuil de 800 ppm plus réduite à mesure que la température augmente (en particulier à partir de 25°C), ce qui peut s'expliquer par une plus grande facilité à aérer

avec une météo estivale. Les résultats sont similaires pour les réfectoires (écoles et collèges). En revanche, les résultats sont moins nets pour les salles de classe des écoles, pour lesquelles des températures plus élevées n'ont pas d'effet visible sur les durées de dépassement. Ces résultats seront à consolider, avec plus de capteurs mais aussi une période de mesure plus longue pour plus de variabilité de température.

- **Présence d'une Centrale de Traitement de l'Air (CTA) :** La présence d'une Centrale de Traitement de l'Air (CTA) dans les crèches a un impact significatif sur les concentrations, avec des niveaux médians dans les salles de 1187 ppm sans CTA, et de 849 ppm avec CTA. Pour les dortoirs, cet impact est également visible, avec des niveaux médians de 1141 ppm sans CTA, et de 828 ppm avec CTA. En revanche, pour les salles du personnel, si l'effet est vrai pour la majorité des salles, cela n'est pas le cas pour une salle où malgré la présence d'une CTA les teneurs restent élevées (indice de confinement de 3).

4. Propositions de recommandations aux enseignants et personnel éducatif

Afin de traduire en message clairs et facilement appropriables par tous les enseignements de l'analyse de données, les recommandations générales suivantes peuvent être proposées :

Par exemple pour un créneau de cours d'une heure :

- Aérer à l'arrivée des enfants ou pendant l'interclasse
- Aérer 30 minutes après l'arrivée des enfants
- Aérer à la fin du cours, jusqu'au début du cours suivant
- Chaque aération devant idéalement durer 10 minutes

Ces recommandations sont à adapter pour certains contextes particuliers, par exemple pour les dortoirs des crèches où les niveaux peuvent monter très rapidement au-delà du seuil recommandé (10 minutes).

NB : le maintien des autres gestes barrières (port du masque, distanciation physique, lavage des mains et des surfaces) reste indispensable même avec de bonnes pratiques d'aération. En effet l'aération régulière des espaces clos permet de faire baisser le risque de transmission du virus par aérosols, mais elle ne l'annule pas et n'a pas d'impact sur les autres modes de transmission (par gouttelettes et par contact).

4. Retours d'expérience et recommandations pour la phase 2

1. Retours d'expérience sur la mise en place et le suivi de la phase 1

Le projet « Aérons » a été élaboré et mis en place dans un contexte extrêmement complexe, lié à l'urgence de la lutte contre l'épidémie de COVID-19 en milieu scolaire. La période de déploiement des capteurs a de plus été bouleversée par la fermeture des écoles et des collèges à partir du 5 avril 2021.

Ce contexte difficile a entraîné certaines difficultés dans la mise en place et le suivi du projet, difficultés qu'il semble important d'identifier et de discuter afin de s'en prémunir dans le cadre de la phase 2.

Déploiement des capteurs et mise en base

Sur un échantillon initial de 500 capteurs, seuls 188 ont pu être intégrés dans le périmètre de l'étude. Cela est dû à plusieurs paramètres. Premièrement, des retards pris dans le déploiement des capteurs (difficultés rencontrées par le prestataire de pose pour l'accès aux établissements – exacerbées par la fermeture des écoles et des collèges). Ces retards ont conduit à exclure un certain nombre de capteurs de l'analyse, étant donné que celle-ci doit impérativement porter sur un échantillon fixe de capteurs installés et opérationnels sur toute la période de mesure (1 mois). Deuxièmement, le suivi et l'identification des capteurs installés a parfois fait défaut (numéro de DEVEUI manquant, informations contradictoires sur les types d'établissements ou les types de salle), ce qui a à nouveau conduit à écarter des capteurs du périmètre de l'étude. Troisièmement, la validation des données effectuée par Airparif a conduit à écarter un nombre important des capteurs restant (cf supra) compte tenu principalement de taux de données disponibles trop faible pour permettre une analyse de données la plus fiable possible.

Toutes ces raisons ont conduit à un échantillon de capteurs beaucoup plus réduit et moins représentatif que prévu, ce qui n'a pas permis de procéder à tous les traitements envisagés ni de tirer des enseignements consolidés.

Suivi des participants à l'étude comportementale

Plusieurs points ressortent qui ont trait à l'organisation de l'expérimentation et viennent confirmer des besoins identifiés par l'équipe projet.

- Les niveaux d'informations sont assez disparates, une personne rapporte même que n'ayant pas été informée de l'installation du capteur elle n'a découvert sa présence que très tardivement.
- Plus globalement, on voit bien que tous les usagers n'ont pas été exposés aux mêmes conditions d'usage, ce qui pourrait peser sur la capacité des chercheurs à réaliser des comparaisons s'ils avaient eu les moyens de le faire.
- La diffusion des questionnaires a donné lieu à diverses incompréhensions, notamment sur le fait qu'il faille les faire suivre aux usagers finaux et sur les manières envisageables d'y parvenir (réponse via un smartphone par exemple).
- Tous ces points semblent converger pour défendre l'idée qu'il est indispensable pour les chercheurs de pouvoir communiquer directement avec les usagers finaux pour mener correctement à bien une expérimentation telle que celle-ci, sans doute en passant par une phase de « recrutement » initial, quitte à réduire les effectifs impliqués (cf. *infra*).

2. Recommandations pour la phase 2

Capteurs

- **Echantillon** : afin de permettre une analyse robuste des données collectées, un nombre important de capteurs opérationnels est nécessaire. La Ville de Paris ayant fait l'acquisition de 500 capteurs dans le cadre du projet, il serait pertinent de pouvoir intégrer tous ces capteurs dans le périmètre de l'étude, en prévoyant toutefois un taux de perte d'environ 10% (qui est le taux de perte habituel dans les projets de déploiement de capteurs en air intérieur).

- **Représentativité** : il importerait de veiller à une bonne représentativité de cet échantillon, en termes de type de salle et de type d'établissements.
- **Proportion de capteurs Test/Contrôle** : afin de pouvoir nourrir efficacement l'étude comportementale en faisant des comparaisons robustes, une proportion nettement plus importante de capteurs Contrôle serait nécessaire (idéalement près de 50% des capteurs déployés).
- **Installation des capteurs dans les collèges** : l'absence d'impact différencié entre les capteurs Test et les capteurs Contrôle (contrairement à ce qui a été observé dans les écoles) pourrait être le signe d'une moindre appropriation des capteurs par les enseignants des collèges, qui changent généralement de salle plusieurs fois au cours de la journée. Pour investiguer ce point, il pourrait être intéressant de prioriser l'installation de capteurs dans les salles de sciences, d'arts plastiques, et de musique, où la rotation des enseignants est moindre. De plus, les salles de musiques, où le chant est pratiqué, posent de vrais enjeux en termes de production d'aérosols potentiellement porteurs du virus. Une autre option pour investiguer ce point serait de renforcer l'information et l'accompagnement des enseignants de collèges sur l'appropriation des capteurs.
- **Suivi du déploiement et construction du tableau de suivi** : une attention devra être portée au suivi du déploiement de ces capteurs, afin de produire une base de données aussi complète et solide que possible.
Concernant le tableau de suivi de Sogétrel, des améliorations sont nécessaires pour le rendre pleinement utilisable pour la mise en base des données : en particulier, remettre en forme le tableau pour avoir une ligne par capteur (DEVEUI) et non une ligne par établissement.
Par ailleurs, la colonne « nom de salle » n'est pas assez explicite ; on y retrouve soit le numéro de la classe, soit le nom de la classe, mais pas le type de salle. Des hypothèses ont donc du être formulées sur le type de salle associé. Pour la phase 2, une standardisation du type de salle, homogène dans tout le tableau de suivi, serait nécessaire.
- **Capteurs Nanosense** : concernant les capteurs Nanosense, il serait nécessaire d'attendre au moins 2 semaines avant de commencer l'exploitation des données, afin d'éviter des problèmes d'offset comme pour la phase 1 (auto-calibration des Nanosense). Toujours concernant les Nanosense, le pas de temps initialement prévu était quasiment en temps réel, mais les données récupérées avaient un pas de temps de 2 minutes 30 secondes. Il serait intéressant d'investiguer ce point, en particulier pour savoir si cela était dû à un problème de configuration à l'installation des capteurs.
- **Recettage des capteurs** : afin de s'assurer du bon fonctionnement des capteurs avant leur déploiement, il est fortement recommandé de procéder à un recettage des appareils en laboratoire (comme cela avait été proposé pour la phase 1) pour détecter en amont les appareils défectueux. Ce recettage peut porter sur l'ensemble des appareils déployés, ou sur un échantillon aléatoire par lot de production. (par exemple 10% des appareils).
- **Suivi de la remontée des données** : au cours de la période d'analyse, il serait également pertinent d'effectuer un suivi régulier des données, afin d'identifier le plus rapidement possible des problèmes éventuels de communication des capteurs.

Etude comportementale

En ce qui concerne l'étude comportementale, un des points clés ayant émergé de la phase 1 étant le taux d'engagement et le suivi des participants tout au long du projet, il serait pertinent pour la phase 2 de pouvoir constituer un échantillon plus solide, à la fois en termes de représentativité (type d'établissement, capteurs Test/Contrôle) que d'engagement des participants.

Pour ce faire, une phase de recrutement de participants volontaires (50-100 participants) permettrait d'optimiser leur engagement au cours du projet.

Un suivi plus rapproché au cours du projet (avec une mesure objective des comportements d'aération via une fiche de suivi, en plus des questionnaires et des entretiens), ainsi qu'un accompagnement renforcé (en particulier pour les participants qui font état d'inquiétudes ou de difficultés avec les capteurs) permettrait de consolider les enseignements de l'étude comportementale.

A noter qu'une attention devra être portée à la localisation du capteur dans les salles : celui-ci doit être facilement visible à la fois pour les enseignants et pour les élèves (sans pour autant être situé tout à côté d'un ouvrant, ce qui pourrait fausser les mesures effectuées).

Points à approfondir / investiguer dans le cadre de la phase 2

Une phase 2 du projet « Aérons » serait l'occasion d'approfondir certains points abordés lors de la phase 1, afin d'en consolider les enseignements :

- **Impact différencié des capteurs Test/Contrôle** : comme évoqué précédemment, une proportion plus importante de capteurs Contrôle dans l'échantillon permettrait de consolider l'analyse sur l'impact de l'affichage visible sur les pratiques d'aération. Pour approfondir encore cette question et surtout analyser le temps de mise à disposition du capteur nécessaire pour provoquer des changements de comportements durables, il pourrait être envisagé, à mi-parcours de la phase 2, de désactiver l'affichage de certains capteurs (transformer une part des capteurs Test en capteurs Contrôle). Cette opération permettrait de tirer des enseignements précieux sur l'impact de la présence des capteurs, à condition toutefois de porter une grande attention encore une fois au suivi des capteurs et à la base de données.
- **Impact de la température** : la température extérieure étant identifiée comme un des principaux freins à l'ouverture des fenêtres, il serait pertinent d'approfondir le travail de croisement entre les niveaux de CO₂ mesurés et les niveaux de température extérieure, avec un échantillon de capteurs plus conséquents et sur une période de mesure plus longue (afin d'avoir plus de variabilité météorologique). En effet la phase 1 s'étant déroulée sur les mois de mai-juin, avec des températures clémentes, les comportements d'aération et les niveaux de CO₂ en résultant n'ont pas pu être investigués dans des conditions plus froides.
- **Autres paramètres d'influence** : il serait aussi pertinent de mettre à profit la phase 2 pour investiguer l'impact d'autres paramètres d'influence (nombre d'occupants, surface ou volume de la salle, nombre d'ouvrant, type de ventilation...) sur les niveaux de CO₂ mesurés, comme cela avait été envisagé pour la phase 1. Pour ce faire, les données nécessaires devront pouvoir être collectées pour le maximum d'établissements possibles, et incluses dans la base de données finale.
- **Enjeu de qualité de l'air intérieur** : au-delà du contexte de la lutte contre le COVID-19 en milieu scolaire, la qualité de l'air intérieur dans les établissements scolaires est un véritable enjeu sanitaire, trop souvent méconnu. Le déploiement à large échelle de capteurs de CO₂ peut constituer une vraie opportunité pour sensibiliser les équipes pédagogiques et les élèves à ces enjeux d'air intérieur. La phase 2 du projet « Aérons » pourrait comporter la diffusion de supports pédagogiques sur ce sujet (polluants de l'air intérieur, importance de l'aération, le CO₂ comme indicateur du bon renouvellement de l'air). Ces supports pédagogiques permettraient de plus d'améliorer la compréhension de l'expérimentation par les participants, et donc potentiellement leur adhésion.

Ces évolutions apportées au protocole pourraient faire l'objet d'un suivi de l'ensemble des parties prenantes dans le cadre d'un comité de pilotage, responsable des potentiels ajustements nécessaires en cours de déploiement du projet.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Capteurs Class'Air (a) et Nanosense (b) permettant la mesure du CO ₂	3
Figure 2 : Niveaux de CO ₂ (en ppm) relevés (a) et nombre de capteurs disponibles par type d'établissement et de salle (b)	7
Figure 3 : Distributions des indices de confinement (en %) par types d'établissements et de salles établies sur la période 8h-18h (a) et sur la période 11h-14h au sein des réfectoires (b)	8
Figure 4 : Profils journaliers moyens par indice de confinement selon les types d'établissement et de salle.	9
Figure 5 : Temps moyen de dépassement par jour des 800ppm en fonction du nombre moyen de dépassement par jour au sein des salles instrumentées.	10
Figure 6 : Classes de % de jours avec au moins 1 dépassement des 800 ppm par type d'établissement et de salle.....	10
Figure 7 : Nombre moyen de baisses des teneurs de CO ₂ sans retour sous le seuil de 800 ppm par type d'établissement et de salle.	11
Figure 8 : Temps moyen (en minutes) de montée des niveaux de CO ₂ pour atteindre le seuil de 800 ppm par type d'établissement et de salle.	12
Figure 9 : Gains moyens de retour sous le seuil de 800 ppm en ppm/min par type d'établissement et de salle.	13
Figure 10 : Différence d'indice de confinement selon les salles instrumentées d'un capteur « Contrôle » ou « Test » selon le type d'établissement.	14
Figure 11 : Durée de dépassement du seuil de 800 ppm (en heure) selon la température ambiante à l'échelle de la journée par type d'établissement et de salle.	15
Figure 12 : indice de confinement selon l'échantillon de salles équipées ou non d'une CTA.	16