

# La mesure du taux de CO<sub>2</sub>

## Un outil pédagogique pour évaluer la qualité de l'aération

par **Benoît SEMIN**

CNRS - Laboratoire de Physique et mécanique des milieux hétérogènes (PMMH)

École supérieure de physique et de chimie industrielles (ESPCI) - 75005 Paris

[benoit.semin@espci.fr](mailto:benoit.semin@espci.fr)

**Jean-Michel COURTY**

Laboratoire Kastler Brossel (LKB) - Sorbonne Université - 75005 Paris

[jean-michel.courty@upmc.fr](mailto:jean-michel.courty@upmc.fr)

**Florence ELIAS**

Laboratoire Matière et systèmes complexes (MSC) - Université de Paris - 75013 Paris

[florence.elias@univ-paris-diderot.fr](mailto:florence.elias@univ-paris-diderot.fr)

**Sylvain FAURE**

CNRS - Laboratoire de Mathématiques d'Orsay (LMO)

Université Paris-Saclay - 91405 Saclay

[sylvain.faure@universite-paris-saclay.fr](mailto:sylvain.faure@universite-paris-saclay.fr)

**Bertrand MAURY**

Département de mathématiques et applications

École normale supérieure (ENS) - 75005 Paris

Laboratoire de Mathématiques d'Orsay (LMO)

Université Paris-Saclay - 91405 Saclay

[bertrand.maury@universite-paris-saclay.fr](mailto:bertrand.maury@universite-paris-saclay.fr)

et **François PÉTRÉLIS**

CNRS - Laboratoire de physique

École normale supérieure (ENS) - 75005 Paris

[petrelis@phys.ens.fr](mailto:petrelis@phys.ens.fr)

---

**M**ESURER ET AMÉLIORER LA QUALITÉ de l'aération des bâtiments pour lutter contre les maladies respiratoires est une action de santé publique connue depuis la seconde partie du XIX<sup>e</sup> siècle. La mesure de la qualité de l'aération s'est depuis lors grandement simplifiée par le développement de détecteurs de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dont le principe est basé sur la mesure de l'absorption de rayonnement infrarouge. Très récemment, cette mesure a été progressivement mise en avant comme moyen d'améliorer l'aération des lieux clos, geste barrière désormais reconnu de la lutte contre la COVID-19. Plus généralement, améliorer l'aération permet de diminuer les risques de contaminations pour de nombreuses maladies respiratoires et évite la diminution des capacités cognitives associée à un taux de CO<sub>2</sub> dans l'air trop élevé. Nous présentons ici des éléments pour mettre en place ces détecteurs, analyser les résultats et faire de cette mesure physique un outil pédagogique d'amélioration de l'aération, mais aussi d'intérêt scientifique pour les enseignants et les élèves.

## 1. CONTEXTE GÉNÉRAL

Dans le contexte de l'épidémie de coronavirus, la problématique de l'aération et de son contrôle par les mesures de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ont pris une grande importance. Ces questions font intervenir de nombreux phénomènes physiques accessibles dès le niveau collège et directement reliés aux points suivants du programme de lycée : composition chimique des systèmes et quantité de matière (spécialité physique en première), évolution temporelle des systèmes (spécialité physique en terminale), lois de vitesse d'ordre 1, vitesse volumique de disparition, et les aspects reliés au  $\text{CO}_2$  dans l'enseignement scientifique de terminale.

La COVID-19 se transmet principalement par voie aérienne [1-2]. Les moyens physiques de limitation de la transmission incluent le port du masque, la ventilation et l'utilisation de filtres HEPA (*High-Efficiency Particulate Air*, en français filtre à air à haute efficacité). Comme nous le verrons, la mesure du taux de  $\text{CO}_2$  permet de vérifier quantitativement la qualité de la ventilation, d'où sa recommandation par les autorités sanitaires [3-4] et par l'Académie des sciences [5].

Alors que des détecteurs de  $\text{CO}_2$  sont peu à peu déployés dans les établissements scolaires, il nous semble important que les enseignants s'en emparent, et notamment les enseignants de sciences physiques et de chimie. Cet article a pour objectif de mettre en valeur l'intérêt pédagogique de cette mesure : sensibiliser élèves et personnels aux gestes efficaces d'aération, mais aussi utiliser le détecteur comme un outil de mesure physique adapté à la mise en place d'un protocole expérimental et à l'analyse scientifique des résultats.

À court terme, l'enjeu sanitaire est de renforcer le geste barrière qu'est l'aération. À l'usage, il apparaîtra évident que sans détecteur, on ne peut pas estimer l'état de confinement d'un local et donc le risque de contamination par la COVID-19 et ses multiples variants. À plus long terme, améliorer l'aération permettra de lutter contre de nombreuses maladies respiratoires. Enfin, la hausse du taux de  $\text{CO}_2$  diminue (de façon réversible) les capacités cognitives des personnels, enseignants et élèves [4, 6-8]. Il nous semble donc utile dans le cadre de l'école d'améliorer le renouvellement d'air pour faire baisser les taux de  $\text{CO}_2$  là où cela est nécessaire.

Dans cet article, nous présentons la mesure du  $\text{CO}_2$  ainsi que des modélisations de l'évolution du taux de  $\text{CO}_2$  dans une pièce. La modélisation proposée pour une salle étanche ne nécessite que la connaissance des fonctions linéaires, et celle des salles ventilées permet d'utiliser la fonction exponentielle, la méthode d'Euler et les ajustements. Nous fournissons en supplément les programmes *Python* associés qui sont disponibles sur le site de l'UdPPC<sup>(1)</sup>. Enfin, nous donnons le lien entre la production de  $\text{CO}_2$  liée

(1) <https://bupdoc.udppc.asso.fr/consultation/sommaires-an.php>

à la respiration humaine et le métabolisme, et par ailleurs présentons une expérience de mesure de la consommation de  $\text{CO}_2$  lors de la photosynthèse.

### 1.1. La contamination aérienne par le coronavirus

Lorsque nous respirons, parlons, crions, chantons ou éternuons, nous émettons dans l'air que nous expirons un nombre plus ou moins important de petites gouttes. Lorsque nous sommes infectés par le coronavirus SARS-CoV-2, une partie de ces gouttes contiennent des virus. Les gouttes les plus grosses (d'un diamètre supérieur à un centième de millimètre) sont nommées gouttelettes, elles tombent très rapidement sur les surfaces et sur le sol, mais peuvent contaminer une personne à proximité directe. Les gouttes plus fines restent, en revanche, très longtemps en suspension dans l'air ; on les dénomme aérosols. Dans une pièce, suite aux mouvements d'air, les aérosols se répandent progressivement dans tout l'espace accessible. Leur diffusion est identique à celle des parfums ou de la fumée de cigarette, que l'on peut sentir même lorsque la personne qui les a émis est à l'autre bout de la pièce, y compris à plus de deux mètres ou lorsqu'elle est sortie de la pièce.

### 1.2. Qualité de l'air

Il est difficile de mesurer la concentration de particules virales dans l'air. En revanche, le devenir des aérosols est identique à celui des gaz que nous expirons, et mesurer la concentration de ces derniers est plus facile. C'est notamment le cas pour la concentration en  $\text{CO}_2$ . Moins l'aération est bonne et plus cette concentration est importante. On utilise donc le  $\text{CO}_2$  comme gaz « traceur » du renouvellement de l'air d'un local occupé.

En outre, une concentration de  $\text{CO}_2$  élevée provoque une diminution réversible des capacités cognitives, et réciproquement une bonne ventilation améliore les résultats scolaires [9].

### 1.3. Unité de concentration : ppm

La concentration en  $\text{CO}_2$  de l'air extérieur vaut approximativement 0,04 % en 2020, notée usuellement 400 ppm. La concentration en  $\text{CO}_2$  s'exprime en effet en parties par millions (ppm), c'est-à-dire en nombre de molécules de  $\text{CO}_2$  divisé par le nombre de molécules de tous les gaz présents. Comme nous supposons que les gaz vérifient la loi des gaz parfaits, cela correspond aussi à une concentration en volume.

Remarque : la concentration en  $\text{CO}_2$  à l'extérieur peut être supérieure à 400 ppm dans les métropoles lors des pics de pollution, et atteindre 500 ppm voire 600 ppm.

Dans le cadre de la lutte contre la COVID-19, des recommandations ont été émises par le Haut Conseil de la santé publique [3]. Déterminées pour un taux extérieur de 400 ppm, il s'agit de ne pas dépasser un taux de 600 ppm lorsque l'on ne porte pas de masques et un taux de 800 ppm dans les lieux où le masque est porté.

Ces valeurs sont pertinentes dans le cas de milieux clos dans lesquels il n'y a pas de processus de filtration de l'air. En présence d'un filtre de type HEPA comme cela peut être le cas dans certains moyens de transport, il faut connaître les caractéristiques techniques du filtre pour obtenir le lien entre aérosols et taux de  $\text{CO}_2$ .



Figure 1 - Mesure de la qualité de l'air intérieur, détecteur de  $\text{CO}_2$ .

#### 1.4. Mesure de la dilution de l'air déjà respiré

Terminons cette introduction en présentant la notion de dilution de l'air expiré, qui permet de donner une intuition de ce que le taux de  $\text{CO}_2$  représente au niveau de la qualité de l'air et du risque de contamination pour une maladie respiratoire.

La concentration en  $\text{CO}_2$  de l'air expiré est d'environ 4 %, soit 40 000 ppm [14]. Nous notons  $c_t$  la concentration totale en  $\text{CO}_2$ , qui est la quantité mesurée par un détecteur et  $c = c_t - c_0$  la surconcentration en  $\text{CO}_2$  par rapport à la concentration extérieure, notée  $c_0$ . Nous considérons  $c_0 = 400$  ppm pour les applications numériques.

- ◆ Si dans une salle  $c = 400$  ppm (soit  $c_t = 800$  ppm),  
l'air expiré a été dilué  $40\,000/400 = 100$  fois.  
Cela signifie que lors d'une inspiration, 1 % de l'air inspiré est déjà passé dans les voies respiratoires des personnes présentes dans la pièce.
- ◆ Si dans une salle  $c = 2000$  ppm (soit  $c_t = 2400$  ppm),  
l'air expiré a été dilué  $40\,000/2000 = 20$  fois.  
Cela signifie que lors d'une inspiration, 5 % de l'air inspiré est déjà passé dans les voies respiratoires des personnes présentes dans la pièce.

## 2. LES CAPTEURS, LA MESURE

Nous recommandons vivement l'achat de détecteurs de  $\text{CO}_2$  de type «NDIR» (*Non Dispersive Infrared*, aussi appelés détecteurs infrarouge). Ces détecteurs NDIR sont composés d'une source lumineuse émettant un large spectre de lumière infrarouge [10]. Un filtre sélectionne une bande de fréquence qui n'est pas absorbée par le  $\text{CO}_2$ . La détection de l'intensité de cette lumière donne un niveau de référence qui ne dépend pas de la concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'air. Un second filtre sélectionne une partie du spectre de la lumière qui est uniquement absorbée par le  $\text{CO}_2$ . C'est en mesurant l'intensité de ce faisceau et en la comparant avec celle du faisceau de référence que se déduit la concentration en  $\text{CO}_2$ .

Récemment, des détecteurs basés sur une méthode photo-acoustique ont fait leur apparition. Cette technologie semble robuste, mais nous manquons de recul actuellement. Il est par contre très clair que les détecteurs dits «Mox» ou «Cov» ne donnent au mieux que des informations qualitatives sur le taux de  $\text{CO}_2$  et ne sont donc pas adaptés pour les activités que nous présentons ici.

Il est par ailleurs indispensable que le détecteur que l'on utilise soit déjà étalonné en usine ou qu'il puisse l'être par l'utilisateur. Une liste de modèles commerciaux qui conviennent est disponible sur le site projet $\text{CO}_2$ <sup>(2)</sup>.

Dans une salle, le détecteur de  $\text{CO}_2$  doit être placé entre 1 m et 2 m de hauteur, ce qui correspond à la hauteur de la couche d'air que nous respirons. Pour mesurer une valeur représentative, il doit être placé loin des fenêtres, portes, entrées et sorties d'air. Il ne doit pas être mis à proximité immédiate de la bouche d'une personne (minimum 0,5 m). Comme la plupart des appareils électroniques, il faut éviter de le placer à proximité immédiate d'une source intense de chaleur (chauffage). Il est par exemple possible de placer le détecteur sur un mur ou sur le bureau de l'enseignant.

## 3. ANALYSE DES MESURES

Nous montrons comment retrouver par le calcul les variations de la concentration de  $\text{CO}_2$  dans une pièce lorsque l'on connaît son volume, le nombre de personnes présentes et le taux de renouvellement de l'air. Inversement, nous montrons comment déduire de mesures le taux de renouvellement de l'air d'une pièce, lorsque celui-ci n'est pas connu, ce qui est souvent le cas dans les pièces sans ventilation mécanique contrôlée (VMC).

L'analyse de l'évolution de la concentration en  $\text{CO}_2$  dans une pièce présente une différence importante avec les situations analogues habituellement étudiées (désintégra-

(2) <https://www.projetco2.fr>

tion radioactive, réaction chimique...) : le niveau de base n'est pas une concentration nulle, mais la concentration  $c_0$  de  $\text{CO}_2$  présent dans l'air extérieur. Ainsi, l'air frais apporté dans une pièce lorsqu'on en renouvelle l'air contient déjà de ce gaz. Il est donc essentiel de bien préciser aux élèves dès le début si l'on considère dans la modélisation effectuée la concentration totale de  $\text{CO}_2$   $c_t$  ou bien la concentration en excès  $c = c_t - c_0$ . Travailler avec  $c_t$  a comme avantage de permettre une comparaison immédiate avec les résultats de mesure. Travailler avec  $c$  conduit à des équations identiques à celles que l'on a habituellement avec des réactions d'ordre 1. C'est le choix que nous avons fait dans cet article.

### Notations utilisées

Comme décrit au sous-paragraphe 1.4., nous notons  $c_t$  la concentration totale en  $\text{CO}_2$ , telle que mesurée par un détecteur et  $c = c_t - c_0$  la surconcentration en  $\text{CO}_2$  par rapport à la concentration extérieure.

Nous analysons l'évolution de la surconcentration dans une pièce de volume  $V$  dans laquelle se trouvent  $N$  personnes. Une quantité utile est le volume par personne  $V_1 = \frac{V}{N}$ . Pour les applications numériques, nous prendrons  $V_1 = 10 \text{ m}^3$ . Dans une pièce haute de 2,5 m, cela correspond à une surface de  $4 \text{ m}^2$  par personne.

Chacun des occupants de la pièce émet un débit volumique moyen  $Q_{\text{CO}_2}$  de  $\text{CO}_2$ . Nous prendrons comme valeur numérique, le débit typique mesuré pour un adulte au repos (cf. [10, 15]) :

$$Q_{\text{CO}_2} = 18 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} = 0,3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} = 5 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1} = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}.$$

Ce débit dépend bien sûr de l'individu et de l'activité physique. Les dépendances de ce débit avec la pression ambiante et la température étant inférieures à la variabilité entre individus, nous les négligerons.

Dans toute la suite, nous considérerons que la concentration en  $\text{CO}_2$  est uniforme dans toute la pièce. C'est l'approximation de « mélange parfait » (*well-mixed*) qui est tout à fait raisonnable dans les petites salles peu hautes.

### 3.1. Salle étanche

Lorsqu'une salle n'est pas équipée de ventilation mécanique et que portes et fenêtres sont closes, l'air n'est renouvelé que par les éventuelles fuites. On peut ainsi considérer en première approximation qu'elle est étanche.

La surconcentration  $c$  en  $\text{CO}_2$  croît alors linéairement avec le temps. Si cette surconcentration est initialement nulle alors :

$$c(t) = \frac{N Q_{\text{CO}_2}}{V} t = \frac{Q_{\text{CO}_2}}{V_1} t. \quad (1)$$

Avec les valeurs indiquées ci-dessus :

◆ Pour  $t = 15 \text{ min}$

On a alors  $c(t) = 450 \text{ ppm}$ .

Soit la concentration totale est  $c_t = c + c_o$  soit  $850 \text{ ppm}$ .

Cette valeur est supérieure à la valeur cible de  $800 \text{ ppm}$  recommandée par le Haut Conseil de la santé publique en contexte COVID [3]. Cela montre que la concentration en  $\text{CO}_2$  augmente rapidement dans une salle étanche.

◆ Pour  $t = 1 \text{ h}$

On a alors  $c = 1800 \text{ ppm}$ .

La concentration totale est  $c_t = c + c_o$  soit  $2200 \text{ ppm}$ .

### 3.2. Ouvertures successives

Lorsqu'il n'y a pas de ventilation mécanique, on aère en ouvrant les fenêtres (et si possible la porte) avec une période  $\tau$ . Lors de cette ouverture, un volume  $V_r$  d'air initialement dans la pièce est remplacé par de l'air extérieur. Pour simplifier, la durée de l'ouverture est considérée comme négligeable devant la durée séparant les ouvertures.

La surconcentration finale  $c_f$  après l'aération est alors

$$c_f = \frac{V - V_r}{V} c_i \quad (2)$$

où  $c_i$  est la concentration avant l'aération.

En combinant cette équation avec l'évolution linéaire (1), on obtient la relation de récurrence qui relie la surconcentration  $c_{n+1}$  juste avant la  $(n + 1)^{\text{ième}}$  ouverture en fonction de la surconcentration  $c_n$  juste avant l'ouverture précédente.

$$c_{n+1} = \frac{V - V_r}{V} c_n + \frac{N Q_{\text{CO}_2}}{V} \tau. \quad (3)$$

On peut alors résoudre analytiquement la récurrence ou tracer l'évolution avec un tableur ou un programme informatique.

### 3.3. Salle ventilée

L'évolution de la surconcentration lorsque l'on ventile la pièce avec un flux d'air permanent s'obtient en prenant la limite continue de l'équation (3) lorsque l'intervalle entre renouvellement d'air tend vers 0.

$$\frac{c_{n+1} - c_n}{\tau} = -\frac{1}{V} \frac{V_r}{\tau} c_n + \frac{N Q_{\text{CO}_2}}{V}.$$

Soit 
$$\frac{d}{dt} c(t) = -\frac{Q_r}{V} c + \frac{N Q_{\text{CO}_2}}{V} \quad (4)$$

où l'on a introduit le flux d'air entrant  $Q_r = \frac{V_r}{\tau}$  apporté par la ventilation. Le premier terme correspond à la disparition de  $\text{CO}_2$  suite au renouvellement de l'air et le second

terme est le terme source associé à la production de  $\text{CO}_2$  par les personnes se trouvant dans la salle.

*Remarque* : en classe, on pourra aussi partir de l'équation continue (4) et montrer qu'une résolution de cette équation différentielle par la méthode d'Euler correspond en fait à l'évolution discrète (3) correspondant à une aération périodique.

Le rapport  $a = \frac{Q_f}{V_1}$  est appelé taux de renouvellement de l'air (*Air Change per Hour* et noté ACH dans les documents en anglais [11]). C'est la proportion d'air renouvelé par unité de temps. L'équation (4) peut être réécrite en faisant apparaître le volume par personne  $V_1$  sous la forme :

$$\frac{dc}{dt} = + \frac{Q_{\text{CO}_2}}{V_1} - ac.$$

Nous proposons un code permettant de résoudre cette équation numériquement avec la méthode d'Euler téléchargeable sur le site de l'UdPPC. L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) se base aussi sur cette équation et propose un logiciel téléchargeable permettant de simuler l'évolution de la concentration en  $\text{CO}_2$  [13].

### 3.4. Régime permanent

#### 3.4.1. Lien entre concentration en $\text{CO}_2$ et taux de renouvellement de l'air

Le régime permanent est défini comme le régime atteint lorsque la concentration en  $\text{CO}_2$  reste constante au cours du temps, soit  $\frac{dc}{dt} = 0$ . L'équation (4) donne alors :

$$c = \frac{Q_{\text{CO}_2}}{V_1 a} \quad (5)$$

qui se réécrit 
$$c = \frac{NQ_{\text{CO}_2}}{V a}. \quad (6)$$

Si on appelle  $Q_f$  le débit d'air extérieur par personne, soit  $Q_f = aV_1$ , l'équation (5) prend la forme

$$c = \frac{Q_{\text{CO}_2}}{Q_f} \quad (7)$$

ce qui montre que la concentration en  $\text{CO}_2$  est indépendante du volume de la salle  $V$ , et qu'elle ne dépend que de l'apport d'air extérieur par personne.

#### 3.4.2. Applications numériques

En utilisant l'équation (5) et en prenant  $V_1 = 10 \text{ m}^3$ , on trouve :

◆ *Taux de renouvellement*  $a = 1 \text{ h}^{-1}$

$c = 1800 \text{ ppm}$ .

La concentration totale est  $c_t = c + c_o$  soit  $2200 \text{ ppm}$ .

Cela correspond aux valeurs atteintes au bout d'une heure dans le cas de la salle étanche.

◆ *Taux de renouvellement*  $a = 10 \text{ h}^{-1}$

Ce taux de renouvellement correspond à des valeurs usuelles pour les services des maladies infectieuses en milieux hospitaliers [12].

$c = 180 \text{ ppm}$ .

La concentration totale est  $c_t = c + c_o$  soit 580 ppm.

Applications numériques en utilisant l'équation (7)

◆  $Q_f = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

$c = 1800 \text{ ppm}$ .

On retrouve bien la valeur correspondant à  $a = 1 \text{ h}^{-1}$  et  $V_1 = 10 \text{ m}^3$ .

◆  $Q_f = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

$c = 180 \text{ ppm}$ .

On retrouve bien la valeur correspondant à  $a = 10 \text{ h}^{-1}$  et  $V_1 = 10 \text{ m}^3$ .

Ce calcul montre qu'une valeur  $c_t = 580 \text{ ppm}$  correspond à un apport d'air extérieur par personne  $Q_f = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} = 28 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 3.4.3. Détermination expérimentale du taux de renouvellement

Expérimentalement, le régime permanent est atteint lorsque la valeur  $c_t$  mesurée par le détecteur de  $\text{CO}_2$  reste constante au cours du temps. Dans ce cas, si on connaît le volume de la pièce et le nombre de personnes, on peut en déduire le taux de renouvellement de l'air, en réécrivant l'équation (6) sous la forme :

$$a = \frac{NQ_{\text{CO}_2}}{V(c_t - c_o)} \quad (8)$$

Le taux de renouvellement dépend de la configuration de la salle, en particulier si les fenêtres et les portes sont ouvertes ou fermées. Par contre, il ne dépend pas du nombre de personnes. Une fois le taux de renouvellement mesuré, l'équation (6) permet de déterminer la jauge d'une salle, si on ne veut pas dépasser une valeur maximale de concentration en  $\text{CO}_2$ .

## 3.5. Régime transitoire

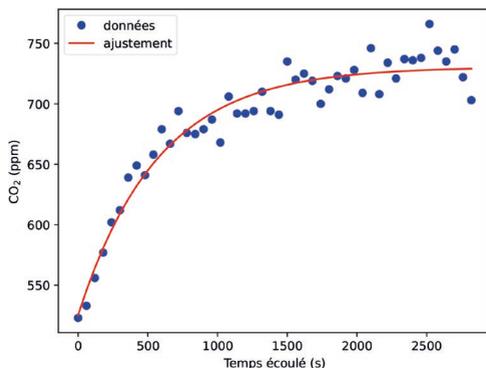
Mesurer la concentration au cours du temps permet de vérifier que le régime permanent a bien été atteint, et que le taux de renouvellement de l'air est constant au cours du temps.

En effet, si le taux de renouvellement d'air est peu élevé, le temps caractéristique pour atteindre le régime permanent est grand. Les conditions d'aération sont alors susceptibles de changer pendant le régime transitoire. Les conditions d'aération étant

fixées, la solution de l'équation (4) en régime transitoire s'écrit :

$$c = \frac{Q_{CO_2}}{V_1 a} + \left( c(t=0) - \frac{Q_{CO_2}}{V_1 a} \right) \exp(-a t). \quad (9)$$

On observe que la concentration tend exponentiellement vers la solution du régime permanent  $\frac{Q_{CO_2}}{aV_1}$  donnée par l'équation (5). Le temps caractéristique vaut  $a^{-1}$ . L'ajustement de données réelles mesurées par un détecteur Aranet4 est présentée en figure 2. Le code *Python 3* adapté est disponible en téléchargement sur le site de l'UdPPC<sup>(3)</sup>.



**Figure 2** - Concentration en CO<sub>2</sub> (en ppm) en fonction du temps en seconde.  
Points bleus : données expérimentales - ligne rouge : ajustement exponentiel par l'équation (9).



**Figure 3** - Détecteur Aranet4.

L'ajustement est satisfaisant : le modèle est approprié et la configuration est bien constante en temps. Nous trouvons  $a^{-1} = 571$  s, soit  $a = 6,3$  h<sup>-1</sup>. Le taux de renouvellement de cette salle est assez bon. L'écart entre la valeur finale et le niveau de base est ici de 250 ppm ce qui est aussi en accord avec la prédiction de l'équation (5).

(3) Trace ajustement mesures Aranet.py

### 3.6. Rôle de la configuration de ventilation

Pour des conditions d'aération fixées,  $a$  ne dépend pas de l'occupation de la salle. Une mesure possible est donc de tester comment le régime permanent, équation (8), et le régime transitoire, équation (9), dépendent du nombre  $N$  de personnes présentes.

Il faut garder en tête que le taux de renouvellement de l'air,  $a$ , est lié à l'ouverture des fenêtres et des portes et dépend beaucoup de la configuration (position des ouvrants dans la salle) et des conditions météorologiques.

Considérons une configuration avec des portes fermées, en l'absence de vent à l'extérieur. Lorsque l'on ouvre une fenêtre, l'échange d'air entre l'intérieur de la pièce et l'extérieur est lié à la différence de masse volumique entre l'air intérieur et extérieur, qui est elle-même liée à la différence de température. En première approche, le débit est proportionnel à la racine carrée de l'écart en température. Cet effet explique que l'ouverture des fenêtres est plus efficace pour renouveler l'air en hiver qu'en été. Par ailleurs, le vent peut augmenter nettement les débits d'air liés aux ouvertures de fenêtres.

Un débit d'air plus grand est obtenu en ouvrant à la fois les portes et les fenêtres. Si la porte ouvre sur le couloir, le fait d'ouvrir une fenêtre dans ce couloir permet d'augmenter le débit d'air. De manière générale, les « courants d'air », aussi appelés « ventilation traversante » sont particulièrement efficaces pour renouveler l'air d'une salle.

## 4. ESTIMATION DU VOLUME PRODUIT DE CO<sub>2</sub> PAR UN BILAN ÉNERGÉTIQUE

Nous avons noté  $Q_{CO_2}$  le débit volumique de CO<sub>2</sub> émis par un être humain. Ce débit dépend de l'individu et de l'activité physique. Comme la quantité émise est en fait une masse de CO<sub>2</sub>, ce volume dépend un peu de la température et de la pression via la loi des gaz parfaits. Cet effet est habituellement négligé.

Les valeurs de  $Q_{CO_2}$  standard [10, 15] pour une personne au repos sont de

$$18 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} = 0,3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} = 5 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1} = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}.$$

Le but des calculs qui suivent est d'estimer la quantité  $Q_{CO_2}$ , à partir de la quantité d'aliments consommés quotidiennement.

L'apport journalier de référence est de 2000 kcal, soit en unité du système international 8400 kJ, ce qui correspond à une puissance d'environ 100 W [16]. L'apport d'un gramme de glucide est de 4 kcal. On suppose que l'individu étudié ne mange que du sucre. Il lui est alors nécessaire de manger  $m_s = 2000/4 = 500$  g de sucre par jour.

On considère que le sucre est du glucose de formule C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>. La masse molaire

du glucose est

$$M_g = 6 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16 = 180 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

Ce sucre réagit avec le dioxygène de l'air :



La masse molaire de  $\text{CO}_2$  vaut  $M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ . D'après l'équation (10), la masse de  $\text{CO}_2$  émise est

$$m_{\text{CO}_2} = m_s \frac{6M_{\text{CO}_2}}{M_g} \text{ soit } 750 \text{ g}.$$

Le nombre de moles émises en un jour vaut

$$n_{\text{CO}_2} = m_s \frac{6}{M_g} \text{ soit } 17 \text{ mol}.$$

En utilisant la loi des gaz parfaits, la valeur de  $Q_{\text{CO}_2}$  vérifie

$$Q_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2} RT}{t_{\text{jour}} P} \text{ soit } \frac{17}{3600 \times 24} \times \frac{8,31 \times 293}{10^5} = 4,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}.$$

Avec  $t_{\text{jour}}$  la durée du jour,  $R$  la constante des gaz parfaits,  $T$  la température et  $P$  la pression atmosphérique.

Ce résultat est cohérent avec les données discutées plus haut. Pour une estimation plus précise, il faut prendre en compte que nous mangeons aussi des protéines et des graisses, que nous effectuons de l'activité physique...

## 5. CONCLUSIONS ET AUTRES ACTIVITÉS POSSIBLES

Alors qu'il est difficile pour ne pas dire impossible d'estimer sans mesure la qualité de l'aération d'un local, la mesure du taux de  $\text{CO}_2$  permet d'accéder au taux de renouvellement d'air et donc de déterminer si l'apport d'air frais est suffisant pour éviter d'être contaminé par des maladies aéroportées.

La mesure du taux de  $\text{CO}_2$  rend concret le risque de contamination, elle incite à agir en ouvrant portes et fenêtres. Elle permet aussi, lorsqu'il fait froid, de n'ouvrir que la durée nécessaire pour que le local retrouve des taux de  $\text{CO}_2$  acceptables.

Cette mesure, aisée et largement accessible, permet à tous d'apprendre comment bien aérer en classe, mais aussi chez soi ou dans d'autres lieux clos (cantines, salles de sport, restaurants...). Les éléments pédagogiques pour mener cet apprentissage sont nombreux. Ils sont adaptables à tous les niveaux scolaires. Cet article est destiné aux niveaux collèges et lycées, mais des activités sont possibles dès l'école primaire [17]. Parmi les outils qui peuvent être étudiés en parallèle de la mesure, nous avons présenté ici des traitements de données standards (ajustements linéaires ou exponentiels) ainsi qu'une approche originale de la méthode d'Euler.

D'autres pistes pédagogiques existent puisque la mesure de la concentration de

CO<sub>2</sub> en phase gazeuse permet d'étudier d'autres phénomènes que ceux liés à la respiration humaine et à la ventilation.

Nous décrivons brièvement une étude d'un processus de photosynthèse. Le montage utilise une plante verte (ici, les mesures ont été réalisées avec un pot de *Hemionitis Arifolia*) que l'on place dans un récipient étanche et transparent, tel qu'une cloche en verre de taille suffisante. La mesure du taux de CO<sub>2</sub> dans la cloche est réalisée et on varie l'intensité lumineuse en couvrant la cloche d'un drap noir ou en l'éclairant avec une lampe de type lampe de bureau.

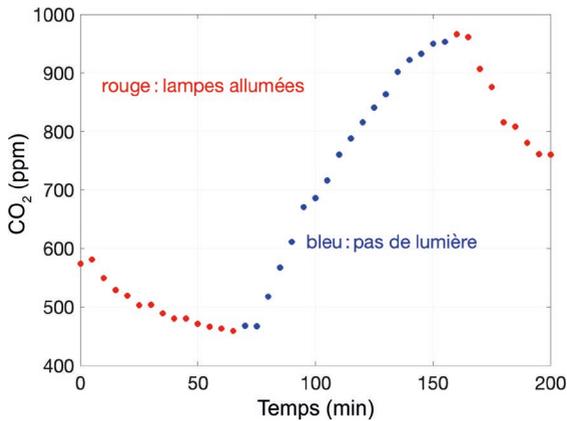


Figure 4

On observe que la luminosité affecte les variations de CO<sub>2</sub>. À forte luminosité, le taux décroît tandis qu'à basse luminosité, il croît. C'est bien ce que l'on attend de la photosynthèse [18]. La cloche faisant à peu près 15 litres, une quantité de 1000 ppm de CO<sub>2</sub> correspond à 15 cm<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>, soit une masse de  $15 \times 10^{-6} \times 1,87 = 30$  mg de CO<sub>2</sub> en prenant  $1,87 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  comme masse volumique du CO<sub>2</sub>.

Enfin, parmi les autres activités possibles, on pourra étudier la cinétique de combustion d'une bougie en mesurant l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> dans un volume fini contenant la bougie [19].

## REMERCIEMENTS

Nous remercions nos collègues de projetCO2 Pascal Morenton, Jean-Louis Roubaty et Fabien Squinazi pour de nombreuses discussions sur ce sujet. Benoît Semin remercie Thierry Darnige, Xavier Benoit-Gonin et Justine Laurent pour leur aide technique.

## BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] D. Lewis, “COVID-19 rarely infects through surface. So why are we still deep cleaning?”, *Nature*, February 2021.
- [2] T. Greenhalgh and *al.*, “Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2”, *The Lancet*, April 2021.
- [3] Avis du Haut Conseil de la santé publique, « Covid-19 : aération, ventilation et mesure du CO<sub>2</sub> dans les ERP » :  
<https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=1009>
- [4] Avis du Haut Conseil de la santé publique, « Avis relatif à la mesure du dioxyde de carbone dans l’air intérieur des établissements recevant du public » :  
<https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=1154>
- [5] Avis de l’Académie des sciences, « Protocole sanitaire : étendre rapidement l’usage des détecteurs de CO<sub>2</sub> aux locaux d’enseignements », du 11 juin 2021 :  
<https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academie/protocole-sanitaire-etendre-rapidement-l-usage-des-detecteurs-co2-aux-locaux-d-enseignement.html>
- [6] U. Satish and *al.*, “Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? Direct effects of low-to- moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human decision-making performance”, *Environ Health Perspect.*, 120 (12), p. 1671-1677, 2012.
- [7] J.-C. Allen and *al.*, “Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments”, *Environ Health Perspect.*, 124 (6), p. 805-812, June 2016.
- [8] T. Vehviläinenag, “High indoor CO<sub>2</sub> concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO<sub>2</sub> level and sleepiness during cognitive work ”, *J. Occup Environ Hyg.*, 13 (1), p. 19-29, 2016.
- [9] P. Barrett and *al.*, “Clever Classrooms, Summary report of the HEAD Project”, 2015 : <https://core.ac.uk/download/pdf/42587797.pdf>
- [10] B. Semin, E. Kierlik et J.-M. Courty, Comment bien aérer les pièces, *Pour la Science*, n° 518, décembre 2020 :  
<https://www.pourlascience.fr/sr/idees-physique/comment-bien-aerer-les-pieces-20353.php>
- [11] Definitions of terms and abbreviations commonly used in REHVA publications and in HVAC practice, mai 2012 :  
[https://www.rehva.eu/fileadmin/HVAC\\_Terminology/4th\\_Draft\\_2012.05.02\\_-\\_HVAC\\_Terminology.pdf](https://www.rehva.eu/fileadmin/HVAC_Terminology/4th_Draft_2012.05.02_-_HVAC_Terminology.pdf)

- [12] Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities, 2003 : <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/environmental/appendix/air.html>
- [13] INRS, « Ventilation et CO2 : outil de calcul » : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil97>
- [14] Wikipédia, “Breathing” : <https://en.wikipedia.org/wiki/Breathing>  
Page consultée le 5 avril 2022.
- [15] A. Bergner, « Ventilation et traitement de l’air dans les bâtiments tertiaires », *Techniques de l’Ingénieur*, novembre 2018.
- [16] Voir par exemple « Bilan thermique du corps humain », fiche d’enseignement scientifique en classe de première : [https://cache.media.eduscol.education.fr/file/Pluridisciplinaire/89/3/RA19\\_Lycee\\_G\\_1er\\_ES\\_T2\\_Bilan\\_thermique\\_corps\\_humain\\_1167893.pdf](https://cache.media.eduscol.education.fr/file/Pluridisciplinaire/89/3/RA19_Lycee_G_1er_ES_T2_Bilan_thermique_corps_humain_1167893.pdf)
- [17] Voir par exemple « Les séquences pédagogiques » développées par projetCO2 et La Main à la pâte : <https://projetco2.fr/documentpedagogique>  
<https://www.fondation-lamap.org/fr/page/66813/billes-de-sciences-46>
- [18] Pour en savoir plus sur la photosynthèse : [https://rnbio.sorbonne-universite.fr/physio\\_veg\\_photosynthese\\_sommaire](https://rnbio.sorbonne-universite.fr/physio_veg_photosynthese_sommaire)  
[https://rnbio.upmc.fr/physio\\_veg\\_photosynthese\\_03\\_equation\\_1](https://rnbio.upmc.fr/physio_veg_photosynthese_03_equation_1)  
[https://rnbio.sorbonne-universite.fr/physio\\_veg\\_photosynthese\\_05\\_mesure\\_1](https://rnbio.sorbonne-universite.fr/physio_veg_photosynthese_05_mesure_1)
- [19] <https://projetco2.fr/autresthematiques>

### Compléments de l’article

*Cet article comporte des compléments nommés :*

- ◆ *Description fichiers python Bup.pdf*
- ◆ *Euler.py*
- ◆ *Mesures Aranet.csv*
- ◆ *Trace ajustement mesures Aranet.py*

*L’ensemble est disponible sur le site de l’UdPPC sous la forme d’un fichier zippé 10440467.*



**Benoît SEMIN**

*Chargé de recherches au CNRS*

Laboratoire de Physique et mécanique des milieux hétérogènes (PMMH)

École supérieure de physique et de chimie industrielles (ESPCI)

Paris

**Jean-Michel COURTUY***Professeur*

Laboratoire Kastler Brossel  
Sorbonne Université  
Paris

**Sylvain FAURE***Ingénieur de recherches au CNRS*

Laboratoire de mathématiques d'Orsay  
Université Paris-Saclay  
Saclay (Essonne)

**Bernard MAURY***Professeur*

Département de mathématiques et applications  
École normale supérieure (ENS)  
Paris  
Laboratoire de Mathématiques d'Orsay (LMO) - Université Paris-Saclay  
Saclay (Essonne)

**Florence ELIAS***Professeure*

Laboratoire Matières et systèmes complexes  
Université de Paris  
Paris

**François PÉTRELLIS***Directeur de recherches au CNRS*

Laboratoire de physique  
École normale supérieure (ENS)  
Paris