

# Des mesures dans le bâtiment de l'IUT : un exemple de SAé pour la recherche

---

Yacine Boufkhad<sup>1,2</sup> Xiaofeng Guo<sup>1,3</sup> Laurent Royon<sup>1,3</sup> Steeve Reisberg<sup>1,4</sup>

yacine.boufkhad@u-paris.fr

xiaofeng.guo@u-paris.fr

<sup>1</sup> IUT de Paris Pajol, Université Paris Cité

<sup>2</sup> Institut de recherche en informatique fondamentale, UMR 8243

<sup>3</sup> Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain, UMR 8236

<sup>4</sup> Laboratoire Interfaces Traitements Organisation et DYnamique des Systèmes, UMR 7086

**THÈMES** – *Énergie - Informatique - Électronique - Mathématiques - Objets connectés - Mesures Physiques*

**RÉSUMÉ** – *Dans le contexte de crise énergétique actuelle, les bâtiments publics dans l'enseignement supérieur et la recherche ont un rôle à jouer pour moins consommer de l'énergie et mieux servir leurs usagers. Au sein de l'IUT de Paris Pajol, un projet pédagogique a été expérimenté. Le projet, sous la forme pour l'instant d'une SAé pilote a consisté à instrumenter certaines salles de manière non-intuitive et ce sur plusieurs paramètres physiques. Les données récoltées ont permis de mieux comprendre le fonctionnement du bâtiment et ses systèmes énergétiques. L'idée est d'étendre le système développé à d'autres paramètres et le dépolyer sur d'autres bâtiments anciens du même type où il y a une difficulté technique majeure pour mener un audit énergétique précis.*

**MOTS-CLÉS** – *Mesures Physiques, Situation d'Apprentissage et d'évaluation - Dioxyde de Carbone*

## 1 Introduction

Dans cet article, on présente une SAé qui s'inscrit dans un projet pédagogique plus large et lié à la recherche sur l'énergie et le confort du bâtiment dont l'idée est d'utiliser le bâtiment de l'IUT de Paris Pajol comme support où on peut déployer diverses activités pédagogiques destinées aux étudiants du BUT Mesures Physiques. Ces activités (TP, SAé et projets) sont réalisées dans une démarche qui s'inscrit dans les problématiques environnementales, d'économie d'énergie et du confort des usagers tout en étant intégrée dans la logique du cursus universitaire et des apprentissages techniques et professionnalisants définis par le programme national du BUT.

## 2 La SAé

Elle est destinée aux étudiants du BUT Mesures Physiques en première année. Elle regroupe les SAé 1.01 : traiter des données de mesures et 1.05 : Concevoir et coder des utilitaires informatiques pour la physique définies dans le programme national. Le lien est naturel entre ces deux SAé puisque le traitement des données est toujours informatisé. Par conséquent, les regrouper dans une même application informatique que les étudiants doivent développer a du sens. Le travail proposé consiste à écrire un programme qui permet la consultation et l'acquisition de données à travers des capteurs distants qui transitent par un serveur déjà installé et fonctionnel pour les analyser puis restituer sous une forme exploitable. Ce travail classique pour une chaîne de mesures est mis dans un contexte professionnel où les données récupérées et analysées concernent le taux de CO<sub>2</sub>, la température et l'humidité dans certaines salles de cours utilisées par les étudiants.

### 2.1 Intérêt pédagogique et place dans le programme

Le premier intérêt réside dans la mise en situation professionnelle réaliste. Les grandeurs mesurées dans un lieu familier en lien avec l'emploi du temps de l'étudiant ont un sens concret qui apporte une motivation supplémentaire au traitement des données qui résultent des mesures. Sensibilisés à la problématique de l'aération des salles de cours qui s'est particulièrement posée durant la crise sanitaire et à celle des économies de chauffage durant l'hiver 2022/2023, les étudiants voient l'utilité immédiate de faire ces mesures dans un objectif de diagnostic du bâtiment. De plus, on suscite beaucoup d'intérêt chez les étudiants en expliquant aux étudiants que leurs programmes vont servir à collecter des données qui seront par la suite exploitées de diverses manières pour le recherche et notamment dans le domaine de l'environnement.

### 2.2 Déroulement dans la SAé et évaluation

Tous le matériel pédagogique de la SAé est hébergé sous la forme d'un cours sur Moodle. L'installation des

capteurs et du réseau est présenté aux étudiants comme ayant été faits par une société extérieure qui a fait faillite avant d'avoir fini le projet et qui a laissé une documentation éparse et incomplète. Les étudiants sont donc chargés de finir le volet de consultation, acquisition et traitement des données que la société n'a pas réalisée. Un cahier des charges définit ce qui est attendu avec notamment trois livrables avec des échéances précises. La documentation est volontairement touffue et comporte des informations qui ne sont pas directement utiles pour la SAé. Aux étudiants de faire le tri et d'identifier ce qui est nécessaire au travail demandé. L'évaluation comporte un volet d'auto-évaluation par l'étudiant de son travail, un volet d'évaluation par les pairs. Les étudiants testent les programmes les uns des autres et émettent des remarques. Enfin, ce travail d'évaluation par les pairs ainsi que la réalisation elle-même est noté par l'enseignant selon une grille qui décompose les apprentissages critiques définis dans le programme national.

Un exemple de courbe d'acquisition est donné en Fig. 1, où on remarque clairement la montée en température d'une salle occupée durant la période de chauffage.

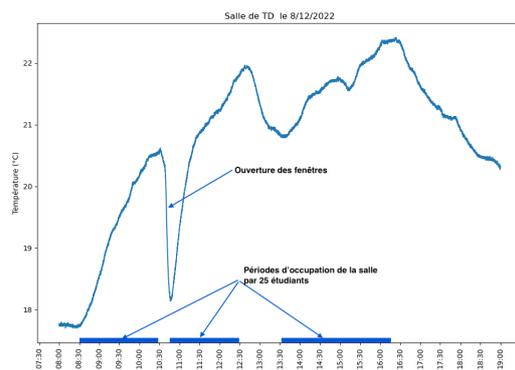


FIGURE 1 – Exemple de relevé de température sur une journée ouvrée dans une salle de TD, corrélé à l'occupation.

## 3 Exploitation des données pour la recherche : un modèle d'évolution du taux de CO<sub>2</sub> dans une salle

Des techniques d'analyse peuvent être basées sur la physique du bâtiment ou sur la data, voire les deux dans une approche dite hybride [1–3]. Dans le cadre de cette étude, nous utilisons un modèle physique mono-zone pour analyser le phénomène de transfert de masse dans une salle de TD, en prenant en compte de le renouvellement d'air, des émissions de CO<sub>2</sub> des occupants ainsi que le planning des enseignements.

Le bilan de matière dans une salle ventilée mécanique-

ment, avec une émission de CO<sub>2</sub> par occupant notée  $\dot{s}$ , s'écrit :

$$\frac{dC}{dt} = \tau(C_{ext} - C) + \nu\dot{s} \quad (1)$$

où  $C$  est la concentration du CO<sub>2</sub> supposée homogène dans la salle,  $C_{ext} = 420$  ppm est celle de l'air neuf.  $\tau$  est le taux de renouvellement d'air par rapport au volume total en vol/h, et enfin  $\nu$  est le taux d'occupation en occupant/m<sup>3</sup>.

La solution analytique de ce modèle réduit montre une courbe exponentielle dont l'allure dépend du taux de renouvellement d'air  $\tau$  :

$$C = (C_{ini} - C_{ext})e^{-\tau t} + C_{ext} + (1 - e^{-\tau t})\frac{\nu\dot{s}}{\tau} \quad (2)$$

avec  $C_{ini}$  la teneur initiale de CO<sub>2</sub>.

Les résultats du modèle permet de la confrontation des données de mesures et celles issues du modèle. Fig.2 montre l'évolution de la concentration du CO<sub>2</sub> sur une journée type en semaine. 25 étudiants ont été présents lors de trois séances de TD du matin. Quant à l'après midi, la salle a été inoccupée par des enseignements mais en libre accès. A noter que la porte de la salle est automatiquement fermée après chaque passage durant les pauses.

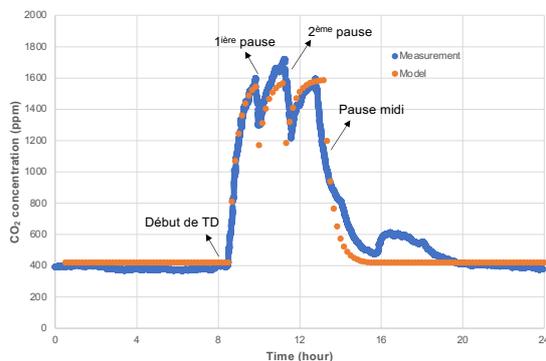


FIGURE 2 – Comparaison des concentration de CO<sub>2</sub> entre relevé et modèle. Données sur une journée ouvrée dans une salle de TD où il y a trois séances de TD le matin et en libre accès l'après midi.

Nous constatons globalement une très bonne satisfaction entre le modèle et les mesures, en particulier sur la montée de la courbe au démarrage de la journée (premier TD). Durant cette période, il n'y a pas eu d'ouvertures de portes ou fenêtres jusqu'à la pause. Le léger décalage sur le descente est dû à la présence des occupants en salle pendant la pause, contrairement au modèle qui suppose une présence nulle. De ce fait, le modèle prédit une plus faible concentration avant le démarrage du second TD. Ainsi le pic de concentration constaté par les mesures n'apparaît pas dans le modèle. De la même manière, la présence de certains

étudiants dans la salle en accès libre, entre 16h et 18h, a contribué à l'augmentation de CO<sub>2</sub>. Le modèle ne tient pas en compte de cela. A terme, un détecteur du nombre d'occupants serait nécessaire afin de mieux chiffrer leur nombre en particulier sur les créneaux horaires hors planning scolaire.

## 4 Conclusions

Nous présentons ici un projet d'innovation pédagogique implanté dans le bâtiment de notre IUT qui s'inscrit à la fois dans la mise en place d'une SAé et orienté à la recherche. Utiliser le bâtiment comme support pédagogique et les étudiants comme usager-bénéficiaire s'avère particulièrement attractif. Ainsi, la chaîne de mesure multiphysiques, couplée à une plate-forme d'analyse des données récoltées, permet de faire participer des étudiants activement sur les problématiques énergétique et environnementale. De plus, les résultats sont conformes aux modèles théoriques et ils permettent, de manière non-intrusive, de donner des préconisations précises aux gestionnaires du bâtiments pour mieux le piloter.

On peut voir la SAé décrite et le travail de modélisation qui en résulte comme une preuve de concept pour le projet PajolConnecté qui démarre cette année et qui consiste à instrumenter le bâtiment de l'IUT dans le but de mesurer bien d'autres grandeurs que le taux de CO<sub>2</sub>, température et humidité... afin, toujours, de faire des audits qualité du bâtiment dans les domaines de l'énergie, de la qualité de vie et de confort et en tirer des modèles et des propositions d'amélioration dans ces domaines.

## 5 Remerciements

Le projet PajolConnecté a bénéficié du soutien financier du projet IdEx Université de Paris (ANR-18-IDEX-0001). Nous remercions l'ensemble des personnels techniques pour leur collaboration sur la mise en place des capteurs.

## Références

- [1] Bourdeau, M., Zhai, X.-Q., Nefzaoui, E., Guo, X., Chatellier, P. Modelling and forecasting building energy consumption : a review of data-driven techniques. *Sustain. Cities Soc.* 48, 101533 (2019).
- [2] Bourdeau, M., Guo, X., Nefzaoui, E. Buildings energy consumption generation gap : A post-occupancy assessment in a case study of three higher education buildings. *Energy Build.* 159, 600–611 (2018).
- [3] Allab, Y., Pellegrino, M., Guo, X., Nefzaoui, E., Kindinis, A. Energy and comfort assessment in educational building : Case study in a French university campus. *Energy Build.* 143, 202–219 (2017).