

Étude des environnements éducatifs intelligents et mise en place d'une solution à base d'objets connectés pour améliorer l'expérience éducative

Louise RIEHL, Mansour DEBLOUX

Abstract—L'objectif de ce projet est la réalisation d'une solution à base d'objets connectés pour améliorer l'expérience éducative (à l'école, à l'université, ou même à la maison). Les objets connectés sont une formidable opportunité pour construire un écosystème éducatif plus efficace et plus juste. En effet, de tels écosystèmes peuvent faire en sorte de fournir un parcours éducatif approprié à chacun et de réduire les inégalités pour ceux qui nécessitent une attention particulière. Par exemple, un facteur important dans la réussite du processus d'apprentissage est la concentration. Il peut, cependant, être influencé par de nombreux phénomènes, tels que la fatigue ou les émotions. Notre solution comporte une caméra ainsi que plusieurs capteurs divers (luminosité, volume sonore, température). Les données capturées par ces outils seront réunies et lisibles sur une interface possédée par le professeur. Le but est de faciliter la détection des variations de la concentration au travers de ces phénomènes, afin d'apporter au professeur un outil lui permettant d'adapter son cours d'une meilleure manière, et ainsi, améliorer l'expérience éducative de la classe.

Mots-clés : *objets connectés, concentration, interactivité, environnements éducatifs*

I. INTRODUCTION

Le domaine de l'apprentissage est aussi vaste que complexe. Depuis sa naissance, l'être humain se devait de transmettre son savoir aux autres et aux générations futures afin de pouvoir se développer. En effet, dans ce domaine, la manière dont est transmis ce savoir est tout aussi importante que son fond. Il est donc important de trouver la manière la plus efficace de parvenir à cette tâche.

Le système scolaire actuel est donc la représentation de cet enjeu. Depuis sa modernisation au XIX^e siècle, tout le monde est en droit d'y accéder en France. Malgré cela, ce système se montre peu évolutif, et met les besoins de l'individu en retrait face aux besoins du groupe. C'est pour cela que nous devons trouver une solution pour "moderniser" ce système d'éducation.

C'est ici que la notion de l'Internet des Objets (IdO) entre en jeu. Ce concept relativement récent désigne un réseau collectif de nombreux appareils interconnectés. L'objectif de ce projet de Recherche et Développement est d'incorporer ce concept dans le domaine de l'éducation afin de rendre ce dernier encore plus accessible et efficace, et de réduire les inégalités présentes. Bien que le système scolaire apporte indéniablement des connaissances importantes, le processus d'apprentissage peut facilement être entravé par des facteurs divers tels que les troubles psychologiques, l'ambiance de l'environnement de travail, ou les méthodes employées pour l'enseignement,

entre autres. C'est en étudiant ces facteurs, et en implémentant une solution IdO basée sur cette étude, que nous parviendrons à répondre à la problématique : réaliser une solution à base d'objets connectés visant à améliorer l'expérience éducative. Notons que des solutions basées sur l'IdO existent déjà dans les écoles de nos jours. On peut par exemple citer les interfaces interactives (tableaux, tablettes) permettant aux élèves de participer activement au cours, ce qui, selon des études, contribue à améliorer leurs performances, notamment celles des élèves handicapés [4].

Autrement, il existe de nombreux outils technologiques connectés qui peuvent contribuer en apportant un environnement de travail plus agréable, en améliorant des éléments tels que la température ou le sentiment de sécurité.

Enfin, il existe des solutions visant à personnaliser l'expérience d'apprentissage qui consistent à réunir des informations sur les élèves, pour que le professeur ou les machines elles-mêmes puissent adapter la cadence du cours en fonction de ces informations. C'est sur cet aspect que portera notre sujet de Recherche et Développement.

Notre approche sur le sujet sera la suivante : il faudra capter des informations concernant les élèves, les quantifier et les regrouper, dans le but de les rendre accessibles par le professeur. Ce dernier pourra ainsi adapter le rythme du cours en fonction de ces informations, ce qui réduirait les inégalités entre élèves, et améliorerait donc l'expérience d'apprentissage. Cette approche soulève bien des questions, par exemple : quels signes physiologiques pourraient nous communiquer des informations sur l'état d'un élève ? Comment capter et interpréter ces signes correctement ? Des solutions répondant à cette même problématique existent-elles déjà ? Nous devons prendre en compte toutes ces questions lors de la mise en place d'une solution basée sur l'IdO.

II. ETAT DE L'ART

A. Environnements éducatifs

1. Apprentissage en groupe

Par le passé, l'éducation se faisait de façon plus directe et personnelle. Il était possible de partager des connaissances parmi un groupe à travers certaines "structures" telles que les forums ou les instituts religieux, mais les cours particuliers étaient bien plus communs (de parent à enfant, ou au travers d'un professeur pour les plus aisés).

Cette façon de faire, bien que non structurée, apporte son lot de bienfaits. Faire cours à un seul ou à un petit groupe d'élèves

permettait à ceux-ci de progresser à leur propre rythme, ainsi que de bénéficier de leçons personnalisées, pour faciliter l'assimilation des connaissances. Le professeur peut aussi s'adapter à son élève de manière plus personnelle, et utiliser des méthodes de pédagogie plus implicites telles que motiver son élève, mettre en avant ses talents (mémoire, créativité, etc...), et plus généralement faire preuve de flexibilité.

Depuis, dans le but de rendre ces connaissances plus accessibles, nous sommes passés à l'éducation en groupe, et plus communément le système scolaire que nous connaissons bien aujourd'hui. Ce système est maintenant reconnu comme le moyen d'éducation principal pour une majorité de la population. Les cours sont maintenant donnés par un professeur faisant face à un groupe d'élèves plus grand (d'un nombre pouvant aller de la dizaine à la centaine).

Cette structure apporte évidemment ses bienfaits, tels que le développement de l'écoute et du travail d'équipe. Malgré cela, on y trouve également certains désavantages liés à cette même structure. Le groupe prend les devants et l'individu perd en importance. Le rythme est beaucoup plus inflexible, et ceux qui ne sauront pas le suivre seront bien plus pénalisés dans leur apprentissage.

D'un autre côté, le développement de la science et des connaissances concernant le comportement humain nous permet de soulever certains problèmes liés à l'éducation de manière générale. Nous connaissons maintenant à quel point certains facteurs comme la motivation [5], l'interactivité et les inégalités peuvent donner lieu à l'envie d'abandon, au renfermement, ou à des inégalités plus prononcées.

2. Troubles d'apprentissage

Un point important dans le domaine de la technologie (IdO y compris), est l'accessibilité. Un appareil technologique devrait idéalement pouvoir fonctionner pour tout type d'utilisateur, sans qu'il n'y ait d'influence dans son activité. De même, dans un environnement scolaire, un outil ayant pour utilisateurs des élèves doit pouvoir fonctionner peu importe le profil de l'élève.

Les inégalités liées à l'apprentissage en groupe peuvent être dues à de nombreux facteurs différents, mais l'un des plus importants vient des maladies liées au fonctionnement du cerveau. On peut en citer quelques-unes, comme la dyslexie, la dyscalculie, ou alors les déficits de l'attention (TDAH ou TDA).

Aussi, il est important de noter que certaines de ces maladies, comme le trouble de la concentration, se détectent sur un spectre (sévère, moyen ou faible). Il est donc difficile pour un objet technologique de pouvoir s'adapter parfaitement à une personne ou un cas, si ce type d'information peut être interprété de manière si abstraite [8].

Une solution liée à l'IdO devrait idéalement pouvoir être capable de reconnaître et fonctionner malgré ces inégalités. Nous couvrirons ce sujet et son rapport à notre projet dans une partie suivante.

3. Importance de l'atmosphère

L'atmosphère est un aspect important pouvant influencer les capacités d'apprentissage d'un élève. Certains éléments

méritent d'être monitorés afin d'améliorer l'expérience éducative. Entre autres, on retrouve :

a) La luminosité

La couleur et l'intensité d'une lumière exerce une influence directe sur l'humeur d'une personne. Une couleur "chaude" (rouge, jaune) a tendance à stimuler l'énergie, tandis qu'une couleur "froide" (bleu, vert) donne l'effet inverse [7]. De même pour l'intensité lumineuse, qui peut causer un surstimulation et de l'irritation si celle-ci est trop intense, ou alors de la fatigue si elle est trop faible [2].

b) La température

La température exerce aussi une influence sur les performances d'un élève en classe. D'après les travaux de Wargocki P., Porras-Salazar J.A. et Contreras-Espinoza S. [13], nous pouvons par exemple nous attendre à ce que la performance des tests psychologiques et des tâches scolaires augmente en moyenne de 20% si la température des salles de classe est abaissée de 30°C à 20°C, et que la température pour une performance optimale est inférieure à 22°C.

c) Le volume sonore

Il est important de faire la différence entre le son et le bruit. Le son désigne le volume sonore global de la classe. Cela comprend les paroles du professeur, les bruits ambiants de la salle, etc... Le bruit est moins désiré, et est compris dans le volume sonore de la salle. Ici, on considèrera principalement le bruit, comme les bavardages.

Cet article [11] nous montre que le niveau sonore peut causer plusieurs problèmes, comme une perte de l'efficacité dans la transmission des leçons, une baisse de la concentration, et même une détérioration de la voix des professeurs sur le long terme.

4. Naissance de l'IdO

L'Internet des Objets (ou IdO) est un concept faisant de plus en plus parler de lui. Celui-ci désigne un réseau reliant plusieurs appareils interconnectés, remplissant chacun son rôle, afin d'achever des tâches à plus grande échelle. Ce concept datant de 1999 continue de se développer et d'impacter nos vies de tous les jours. En effet, on trouve maintenant des objets connectés tout autour de nous, des objets portables comme les montres ou bracelets, aux appareils domestiques tels que les thermostats, caméras ou réfrigérateurs.

Ce concept se développe aussi dans plusieurs domaines scientifiques tels que la médecine ou l'informatique. On y trouve de nos jours des objets rendant certaines tâches plus simples et efficaces. Par exemple, un groupe de capteurs formant un réseau connecté peuvent capturer l'état physique d'un patient de manière bien plus précise [9].

L'IdO se montre donc comme une solution permettant d'améliorer l'expérience dans les domaines scientifiques. Malgré cela, les objets connectés se font rares dans le domaine de l'éducation. En dehors des objets susmentionnés (interfaces interactives, outils de contrôle de l'atmosphère), on retrouve difficilement des objets venant directement améliorer l'expérience éducative en fonction de ses aspects moins apparents, tels que la concentration. Les solutions IdO sont encore considérées comme peu accessibles et trop coûteuses en ressources dans la majorité des écoles.

B. Solutions existantes

Certaines idées visant à améliorer l'expérience éducative, dans ses aspects "interactivité" ou "concentration" ont déjà été sujets de réflexion. Afin de créer une solution efficace et utile, il est important d'étudier l'angle d'approche de ces solutions existantes.

1. Solutions "non-IdO"

a) L'application Kahoot

L'application Kahoot est une plateforme d'apprentissage virtuelle permettant aux élèves de répondre à des questions de cours sous forme de jeu. Les élèves de la classe se connectent ensemble depuis leur téléphone à l'exercice lancé par le professeur, et peuvent ensuite répondre aux questions à choix multiples, et tout ceci dans une limite de temps.

L'aspect "jeu compétitif", le système de points, et l'interface intuitive sont importants pour améliorer grandement l'interactivité entre l'élève et le cours donné. L'élève est plus engagé personnellement et sa motivation et concentration augmentent [12].

b) Aides "Réalité augmentée"

La réalité augmentée est une technologie tout aussi nouvelle dans le domaine de l'éducation, mais celle-ci fait déjà l'objet de considération. Cette technologie permet aux élèves d'avoir une représentation plus facile à assimiler de concepts tels que la géographie ou la géométrie. Il existe par exemple l'application Augmented Classroom de CleverBooks, qui propose une solution de la sorte.

Une telle solution peut non-seulement améliorer la qualité de l'expérience éducative par son aspect engageant et interactif, mais aussi réduire les inégalités entre élèves. Ceux rencontrant des difficultés pour comprendre des sujets plus abstraits peuvent maintenant bénéficier d'une aide supplémentaire si-besoin [6].

2. Solutions "IdO"

a) Projet d'amélioration de l'expérience éducative

L'article étudié "Computer Vision and Internet of Things: Attention System in Educational Context" de Savov T., Terzieva V. and Todorova K. [10] est un projet visant à améliorer l'expérience éducative en capturant certaines informations à propos d'un élève afin de représenter sa capacité à apprendre. Cette capture se fait avec l'aide de différents capteurs implémentés sur le bureau de l'élève (capteurs de mouvements, bruits, caméras), et les informations seront interprétées par une machine externe.

On obtiendra alors des données telles que l'expression faciale ("neutre", "heureux", "triste), le niveau de bruit et le niveau d'agitation ("faible", "moyen", "fort"). En réunissant ces données, on obtiendra alors un modèle de comportement correspondant à l'humeur de l'élève ("concentré", "calme", "absent", etc...).

Cette solution se montre comme idéale dans le cas d'une classe au nombre d'élèves réduit, car un système de capteurs unique à l'élève permet de capter son état de manière précise, et ainsi d'améliorer plus efficacement son expérience éducative.

b) Le dataset SCB

L'article étudié "SCB-dataset: A Dataset for Detecting Student Classroom Behavior", de Fan Y. et Tao W. [3] est un projet ayant pour but de répondre au manque de jeux de données (dataset) autour de la détection du comportement des élèves dans une salle de classe.

Ce jeu de données contient plus de 10 000 étiquettes ainsi que 4000 images environ, et celui-ci a été évalué à une précision de 85%. Un exemple d'utilisation proposé dans l'article en lien avec cette solution nous montre une caméra placée dans une salle de classe, pouvant capturer le comportement individuel des élèves.

Le manque de jeux de données facilement accessibles dans ce domaine est un frein pouvant ralentir les recherches, et ce projet vient donc remédier à ce problème (le dataset est directement accessible sur GitHub).

3. Apprentissage automatique

Les réseaux de neurones sont des systèmes inspirés du fonctionnement du cerveau humain. Ils consistent en une collection de neurones interconnectés, organisés en couches, qui traitent l'information en passant des signaux à travers les connexions. Ces réseaux sont utilisés en apprentissage automatique pour apprendre des modèles complexes à partir de données, en ajustant les poids des connexions entre les neurones lors de la phase d'entraînement, ce qui permet au réseau de faire des prédictions ou de reconnaître des motifs dans de nouvelles données. Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont les architectures de réseaux de neurones spécifiquement utilisés pour la reconnaissance d'images et de vidéos.

Il existe différents algorithmes de machine learning adaptés à la reconnaissance des visages qui peuvent être utilisés pour notre solution, tels que Viola-Jones qui explore une image en calculant différentes caractéristiques dans des zones rectangulaires superposées, des caractéristiques simples mais nombreuses. Cette méthode innove en introduisant les images intégrales pour accélérer les calculs, ainsi que le boosting pour choisir les caractéristiques les plus utiles. Elle combine ensuite ces caractéristiques en une cascade de classifieurs pour une détection efficace. C'est une méthode d'apprentissage supervisé : le classifieur a d'abord une phase d'apprentissage avec des exemples positifs et négatifs, puis il est ensuite utilisé pour détecter des objets dans de nouvelles images.

Les machines à vecteur de support (SVM) sont des classificateurs qui visent à séparer des données en différentes catégories, même lorsque la séparation n'est pas linéaire. Les SVM cherchent à trouver une frontière de séparation entre les différentes catégories qui maximise la distance entre cette frontière et les points les plus proches de chaque catégorie. Ces points les plus proches sont appelés vecteurs supports. Pour trouver cette frontière de séparation optimale, les SVM formulent le problème comme un problème d'optimisation quadratique. Cela signifie qu'ils cherchent à minimiser une fonction d'erreur tout en respectant certaines contraintes, notamment la marge maximale entre les points et la frontière de séparation.

Une des approches pour détecter les visages est basée sur la reconnaissance des caractéristiques d'une image. Nous pou-

vons par exemple citer l'Active Shape Model, qui détermine la forme d'objets ou de traits du visage aux moyens de points. Il existe également l'analyse de bas niveau qui se base sur la reconnaissance des éléments tels que la similarité des couleurs de l'image avec la couleur de peau. En utilisant différents espaces de couleurs et en isolant certains canaux, on peut ainsi mieux distinguer cette dernière du reste de l'image car ceux-ci permettent de séparer l'information de la couleur de l'information de l'intensité lumineuse. Des espaces de couleurs comme HSV et YCbCr, où les composantes V (value) et Y (luma) codent l'intensité lumineuse, sont ainsi moins sensibles aux différences d'exposition.

III. CONCEPTION

A. Contexte

L'expression "expérience éducative" rassemble plusieurs contextes possibles et différents tels que l'école, le collège, le lycée, l'université, ou la maison. Nous pouvons différencier les quatre premiers contextes à l'aide de la tranche d'âge concernée. En effet, le temps d'attention nécessaire dépend de l'âge de l'élève ou de l'étudiant [1].

Comme nous l'avons vu précédemment, il est probable dans une salle de classe que certains élèves soient atteints de troubles ou soient dans une situation difficile, cela pouvant nuire à leur expérience éducative. Il faut donc considérer ce type de cas afin de créer une solution pratique et capable de s'adapter à tout type de classe.

B. Scénarios

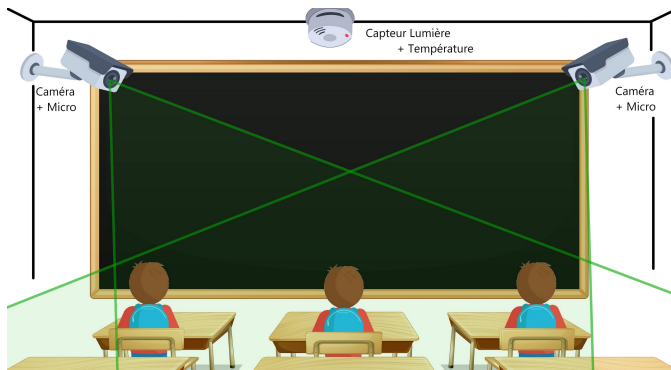


Fig. 1: Le système composé de caméras et capteurs

Notre solution sera composée de plusieurs caméras qui, à l'aide d'un modèle entraîné à partir d'un des algorithmes vus ci-dessus, permettront de reconnaître différentes situations telles que les interactions avec le professeur, un étudiant qui chuchote, qui regarde sur le côté, qui lit son cours ou qui s'endort, et ainsi déterminer son comportement actuel, par exemple un état de calme, de fatigue, d'excitation, ou d'ennui [10]. Elle comportera également des micros, intégrés aux caméras ou non, qui permettront de capter le niveau sonore de la salle, ainsi que des capteurs qui récupéreront des informations sur la température et la luminosité de la salle. Les données pourront être hébergées en ligne sur la plateforme éducative utilisée par l'établissement, ce qui permettrait à la

fois à l'enseignant et à l'étudiant d'y accéder. Un autre moyen d'implémenter cette solution consisterait à installer un système positionné sur la table de chaque étudiant, similaire au système que Savov T., Terzieva V. and Todorova K. ont implémenté dans leurs travaux [10].

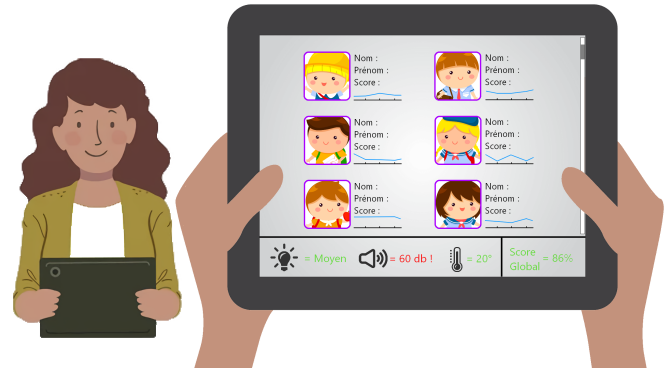


Fig. 2: La tablette mise à disposition du professeur et les différentes informations disponibles

Les informations liées aux différents étudiants récupérées par les capteurs seront communiquées en temps réel au professeur via une tablette, qui affichera la moyenne du niveau de concentration des étudiants, la luminosité et la température de la salle, ainsi que le profil de chaque étudiant comportant son nom, son prénom, son comportement et sa courbe de concentration au fil du temps. Cette courbe pourrait faire apparaître les moments-clefs du cours, tels que le passage à un nouveau chapitre ou une nouvelle activité, pour y faire correspondre la concentration de l'étudiant et ainsi évaluer les difficultés de ce dernier.

La température ainsi que la luminosité pourraient être gérés automatiquement par le système pour maintenir les conditions optimales. L'hébergement des données sur la plateforme éducative permettrait à l'enseignant d'accéder à des statistiques concernant l'évolution de la concentration lors d'un cours ou sur une période donnée, et à l'étudiant de visualiser l'évolution de sa propre concentration en fonction des matières et chapitres étudiés. L'utilisation du terminal permettrait à l'enseignant d'épingler le profil d'un étudiant plus enclin à être déconcentré (en cas de trouble ou de situation difficile) et communiquer avec celui-ci via la tablette pour capter son attention et s'assurer qu'il ait bien compris le cours.

Le cas échéant, il pourrait s'appuyer sur la courbe de concentration de l'étudiant pour cerner le chapitre concerné et lui transmettre une transcription du cours ainsi qu'un questionnaire personnalisé pour vérifier qu'il ait compris et obtenir un retour de l'étudiant sur ce qu'il pense du déroulement du cours. Le questionnaire pourrait être généré au moyen d'un outil utilisant l'intelligence artificielle, auquel le professeur fournirait le chapitre posant problème.

C. Indicateurs Clés de Performance (KPI)

Pour vérifier que notre solution fonctionne, nous avons identifié des indicateurs clés de performance à différents niveaux.

Tout d'abord, nous voudrions mesurer si l'expérience éducative a effectivement été améliorée entre le début et la fin du cours. Pour cela, nous prendrons en compte les retours d'expérience des étudiants sur l'utilité du dispositif mis en place et son impact sur l'engagement et la concentration. Nous prendrons également en compte le retour d'expérience de l'enseignant, pour recueillir sa perception de l'utilité des informations fournies par le système IoT et comment il estime que le système a influencé la qualité de son enseignement. De plus, nous effectuerons des observations directes en classe pour évaluer visuellement l'impact du système sur le comportement des étudiants et de l'enseignant et observer les changements dans la dynamique de classe. Nous comparerons ces observations avec un groupe témoin n'utilisant pas le système, en mettant en évidence les différences observées.

Il faudrait également évaluer la performance des modèles de machine learning. Pour mesurer cela, nous vérifierons que le système remplisse certains critères de détection tels que les visages, les expressions, la luminosité, la température ou le niveau sonore. Pour cela, nous comparerons les données mesurées et la réalité, en mesurant par exemple la température au moyen d'un thermomètre ou l'humeur d'un étudiant au moyen de questionnaires. Notre système devra atteindre un certain niveau de fiabilité des mesures et de précision des données.

Enfin, le système devra fonctionner en temps réel et ne devrait pas excéder un certain temps de latence. Pour cela, nous chronométrerons lors d'un test le temps écoulé entre la collecte des données et leur affichage sur la tablette du professeur.

Sur le long terme, nous avons également pensé à évaluer l'évolution de la performance du réseau utilisé par le système, de la sécurité des données, du coût du système, de l'absentéisme des élèves, de la participation et des résultats scolaires.

IV. CONCLUSION

Nous espérons que l'Internet des Objets trouvera sa place au sein du système scolaire dans le futur, suivant la création de solution facilement accessibles aux professeurs et ludiques pour les élèves. Ce concept apportera de plus en plus de nouvelles possibilités dans son développement, et la normalisation de l'utilisation des objets connectés dans les écoles aurait un impact positif sur les résultats et l'engagement des élèves, donc sur l'expérience éducative en général.

REFERENCES

- [1] N. Cowan, N. M. Fristoe, E. M. Elliott, R. P. Brunner, and J. S. Sauls. Scope of attention, control of attention, and intelligence in children and adults. *Memory & cognition*, 34:1754–1768, 2006.
- [2] A. Daurat, A. Aguirre, J. Foret, P. Gonnet, A. Keromes, and O. Benoit. Bright light affects alertness and performance rhythms during a 24-h constant routine. *Physiology & behavior*, 53(5):929–936, 1993.
- [3] Y. Fan. Scb-dataset: A dataset for detecting student classroom behavior. *arXiv preprint arXiv:2304.02488*, 2023.
- [4] S. Giraud, A. M. Brock, M. J.-M. Macé, and C. Jouffrais. Map learning with a 3d printed interactive small-scale model: Improvement of space and text memorization in visually impaired students. *Frontiers in psychology*, 8:930, 2017.
- [5] J. A. Gray and M. DiLoreto. The effects of student engagement, student satisfaction, and perceived learning in online learning environments. *International Journal of Educational Leadership Preparation*, 11(1):n1, 2016.
- [6] H. Köse and N. Güner-Yildiz. Augmented reality (ar) as a learning material in special needs education. *Education and Information Technologies*, 26(2):1921–1936, 2021.
- [7] L. I. Labrecque, V. M. Patrick, and G. R. Milne. The marketers' prismatic palette: A review of color research and future directions. *Psychology & Marketing*, 30(2):187–202, 2013.
- [8] J. Owens and H. Jackson. Attention-deficit/hyperactivity disorder severity, diagnosis, & later academic achievement in a national sample. *Social Science Research*, 61:251–265, 2017.
- [9] B. Pradhan, S. Bhattacharyya, and K. Pal. Iot-based applications in healthcare devices. *Journal of healthcare engineering*, 2021:1–18, 2021.
- [10] T. Savov, V. Terzieva, and K. Todorova. Computer vision and internet of things: Attention system in educational context. In *Proceedings of the 19th International Conference on Computer Systems and Technologies*, pages 171–177, 2018.
- [11] B. Shield, D. Connolly, J. Dockrell, T. Cox, C. Mydlarz, and R. Conetta. The impact of classroom noise on reading comprehension of secondary school pupils. In *Proceedings of the Institute of Acoustics*, volume 40, pages 236–244. Institute of Acoustics, 2018.
- [12] A. I. Wang and R. Tahir. The effect of using kahoot! for learning—a literature review. *Computers & Education*, 149:103818, 2020.
- [13] P. Wargocki, J. A. Porras-Salazar, and S. Contreras-Espinoza. The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*, 157:197–204, 2019.