

Article

Poussière de craie, santé au travail et qualité de l'environnement pédagogique dans les établissements scolaires de Butembo (RDC) : étude transversale descriptive et cadre de prévention

Kakule Kavatsi Charles

Domaine de Gestion des Entreprises de Développement Rural, Institut Supérieur de Développement Rural de Kitsombiro (ISDR/Kitsombiro), Nord-Kivu, République Démocratique du Congo

Correspondant : kavatsikakule@gmail.com

Citation : Kavatsi, C., Poussière de craie, santé au travail et qualité de l'environnement pédagogique dans les établissements scolaires de Butembo (RDC) : étude transversale descriptive et cadre de prévention. *Etincelle*. 2026, Vol. 26, no. 2. <https://doi.org/10.61532/rime262135>

Reçu: 13 Mai 2026
Accepté: 24 Juillet 2026
Publié: 27 juillet 2026

Note de l'éditeur: Ishango-uac reste neutre en ce qui concerne les revendications juridictionnelles dans les cartes géographiques publiées et les affiliations institutionnelles des auteurs.



Copyright: © 2026 par l'auteur. Soumis pour une publication en libre accès selon les termes et conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Le tableau noir et la craie demeurent utilisés dans les pays à revenu faible ou intermédiaire, malgré les risques liés à la poussière et les contraintes limitant leur remplacement. Cette étude visait à décrire l'exposition à la poussière de craie, les signes sanitaires, les effets pédagogiques rapportés et les capacités de prévention dans les écoles de Butembo. Une étude transversale descriptive a été menée dans 96 écoles, dont 58 primaires et 38 secondaires. Dans chaque établissement, un responsable ou un agent a répondu à un questionnaire. L'établissement constituait l'unité d'analyse. Les proportions ont été accompagnées d'intervalles de confiance à 95 %, et les différences selon le type d'école ont été explorées par un test exact et le V de Cramer. Toutes les écoles utilisaient le tableau noir et la craie, regroupant 2 143 enseignants et 49 525 élèves. Au moins un signe respiratoire était rapporté dans 90,6 % des établissements, notamment la toux fréquente et l'irritation du nez ou de la gorge. Des signes oculo-cutanés étaient signalés dans 93,8 % des écoles, surtout la sécheresse des mains. La salissure des vêtements et les problèmes de visibilité pédagogique étaient fréquents. Les dispositifs de prévention restaient insuffisants : 61,5 % disposaient d'un lave-mains fonctionnel et 51,0 % d'un comité d'hygiène. Seules 14,6 % des écoles avaient engagé une transition, le coût constituant un obstacle. Ces résultats justifient une stratégie graduelle combinant réduction des émissions, effacement humide, ventilation, formation, surveillance et substitution ciblée.

Mot clés : Poussière de craie ; qualité de l'air intérieur ; santé au travail ; enseignants ; environnement scolaire ; prévention ; Butembo.

1. Introduction

1.1 Contexte et justification de recherche

Dans une grande partie des établissements scolaires d'Afrique subsaharienne, le tableau noir et la craie restent des outils pédagogiques de première ligne. Leur coût modéré, leur disponibilité locale, leur simplicité d'utilisation et leur indépendance à l'égard de l'électricité expliquent cette permanence. Ils ne sont toutefois pas neutres sur le plan environnemental. L'écriture, et plus encore l'effacement, libèrent des particules

grossières, fines et parfois ultrafines. La quantité produite dépend notamment de la composition de la craie, de l'état du tableau, de la pression exercée, de la méthode de nettoyage et du renouvellement de l'air (Lin et al., 2015 ; Goel et al., 2017 ; Sekar et al., 2021).

Les études expérimentales montrent que l'appellation commerciale « sans poussière » ne signifie pas « sans émission ». Certaines craies dites antipoussière libèrent encore une fraction respirable, tandis que l'effacement peut générer davantage de particules fines que l'écriture elle-même (Lin et al., 2015 ; Mbazima et al., 2024). Pendant l'enseignement au tableau, Sekar et al. (2021) ont relevé des concentrations moyennes de 498 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10, de 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM2,5 et de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM1, avec une forte variabilité selon les marques et les conditions d'utilisation. Ces valeurs ne peuvent pas être transposées directement à Butembo, où aucune mesure particulière n'a été réalisée ; elles rendent néanmoins plausible le mécanisme d'exposition étudié.

Les enseignants sont exposés de façon répétée, souvent plusieurs heures par jour et pendant de nombreuses années. La toux, l'irritation des voies aériennes supérieures, le larmolement, l'irritation oculaire et la sécheresse cutanée figurent parmi les manifestations possibles. En Éthiopie, une étude multicentrique a associé l'usage de la craie et l'absence d'ouverture des fenêtres à une probabilité plus élevée de symptômes respiratoires chroniques chez les enseignants (Tesfaye et al., 2023). Au Nigeria, Ojukwu et al. (2022) ont également décrit des variations de la fonction pulmonaire et plusieurs facteurs de risque dans cette population. Ces résultats extérieurs soutiennent la plausibilité d'un risque, sans permettre de diagnostiquer une maladie professionnelle dans les écoles de Butembo.

La qualité de l'air intérieur constitue également un enjeu pédagogique. Une classe poussiéreuse, mal ventilée ou visuellement inconfortable peut nuire au confort, à l'attention, à l'assiduité et à l'exécution des tâches scolaires. Les synthèses consacrées aux établissements d'enseignement montrent que la ventilation, le confort thermique et les polluants intérieurs sont liés à la santé et à la productivité des élèves comme des enseignants (Wargocki et al., 2020 ; Sadrizadeh et al., 2022 ; Honan et al., 2024). Santé et apprentissage ne doivent donc pas être opposés : un environnement sain soutient directement l'efficacité pédagogique.

Dans le contexte congolais, moderniser les supports pédagogiques ne consiste pas simplement à acheter de nouveaux équipements. Mpia (2020) souligne que l'innovation peut rester sans effet lorsqu'elle n'est pas accompagnée d'une formation adaptée, d'une actualisation didactique, d'un dispositif de maintenance et d'une gouvernance cohérente. La réflexion de Mpia et al. (2024) sur les liens entre intelligence naturelle et intelligence artificielle va dans le même sens : la technologie devrait renforcer les capacités humaines, sans remplacer mécaniquement l'enseignant ni négliger les réalités éthiques et sociales. Une transition progressive, centrée sur les usages et soutenable financièrement, paraît dès lors plus pertinente qu'un remplacement uniforme du tableau noir.

La présente étude adopte ainsi un cadre qui articule santé au travail, qualité de l'air intérieur et environnement pédagogique. Les réponses recueillies sont interprétées comme des observations institutionnelles. Elles ne constituent ni des diagnostics cliniques ni une preuve d'un lien causal entre la craie et les manifestations rapportées.

1.2. Problème de recherche

À Butembo, l'usage du tableau noir est très répandu, mais les conditions concrètes d'exposition à la poussière de craie restent peu documentées. Les écoles doivent arbitrer entre coût, disponibilité, qualité de l'air, lisibilité, durabilité et intérêt pédagogique, sans disposer de données locales suffisamment structurées. Cette étude répond donc à

la question suivante : quels signes sanitaires, effets pédagogiques et obstacles à la prévention sont rapportés dans les établissements utilisant la craie, et quelles mesures graduées peuvent être raisonnablement mises en œuvre dans ce contexte ?

1.3. Objectifs

L'objectif général est de décrire les risques perçus liés à l'utilisation du tableau noir et de la craie, les manifestations observées chez certains enseignants, les effets sur l'environnement pédagogique et les capacités institutionnelles de prévention dans les écoles de Butembo. De façon spécifique, il est question (i) de décrire la place du tableau noir, de la craie et des autres supports dans les établissements enquêtés, (ii) d'estimer la proportion d'écoles rapportant des signes respiratoires, oculaires ou cutanés chez certains enseignants, (iii) de décrire les effets rapportés sur la propreté, la lisibilité, le confort et la conservation du matériel, (iv) d'examiner les infrastructures de prévention, les connaissances relatives aux alternatives et les obstacles à la transition et (v) de proposer un cadre de prévention et un protocole de recherche ultérieur permettant d'examiner les relations causales.

1.4. Hypothèses

Compte tenu du caractère descriptif et institutionnel des données, les hypothèses ont été formulées comme des attentes analytiques, et non comme des affirmations causales : Les établissements utilisant quotidiennement la craie rapportent fréquemment des irritations et des gênes compatibles avec une exposition aux particules (H1) ; Les problèmes de propreté, de visibilité et de confort sont rapportés dans une proportion importante des écoles (H2) ; Les capacités de prévention et l'engagement dans la transition restent inférieurs à la fréquence des problèmes rapportés (H3) ; Le type d'école peut être associé à certaines ressources de prévention, sans nécessairement modifier la fréquence des constats liés à un usage quasi universel de la craie (H4).

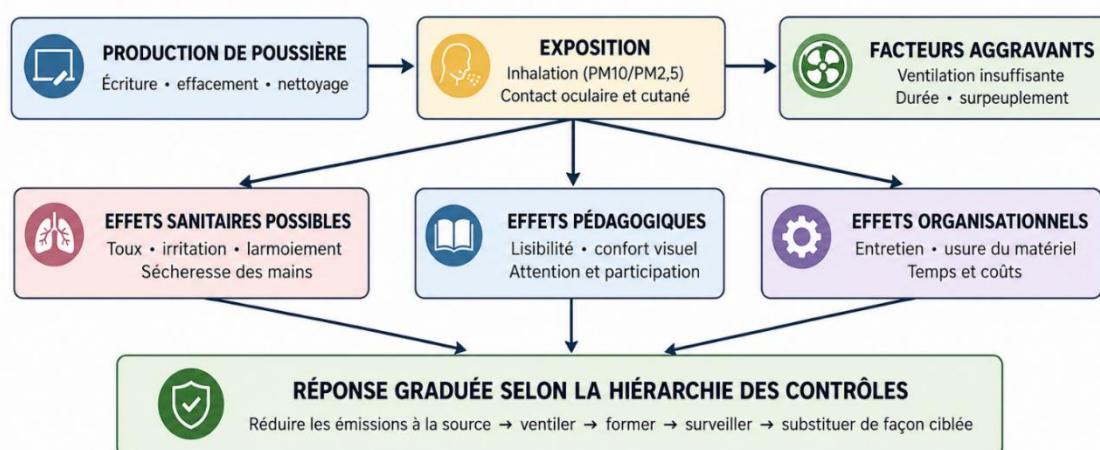


Figure 1. Modèle conceptuel reliant la production de poussière, les voies d'exposition, les effets possibles et la hiérarchie des mesures de prévention.

2. Matériel et méthodes

2.1. Devis, milieu et unité d'analyse

Une étude transversale descriptive a été menée dans la ville de Butembo, province du Nord-Kivu, en République démocratique du Congo (RDC), auprès d'écoles primaires et secondaires de la sous division Butembo I. L'établissement scolaire constituait l'unité d'analyse. Dans chaque école, le questionnaire a été renseigné par un directeur,

un préfet, un enseignant ou, plus rarement, un autre agent connaissant le fonctionnement de l'institution. Ce choix permet de décrire des pratiques et des constats institutionnels, mais non d'estimer la prévalence individuelle des symptômes chez les enseignants.

La base de sondage qui est la sous division Butembo I contient 180 Ecoles Primaires (dont 81 EP Privées, 89 EP conventionnées et 10 EP Etatiques ou Non conventionnées) et 127 écoles secondaires (dont 61 privées, 56 conventionnées et 10 non conventionnées ou étatiques). La formule suivante nous a permis de trouver la taille de l'échantillon :

$$n = \frac{(Z_{\alpha})^2 * p * (1 - p)}{i^2} = n = \frac{(1,96)^2 * 0,5 * (1 - 0,5)}{0,08^2} = 150.$$

La taille de la population étant connu, nous avons réduit la taille de l'échantillon par la formule :

$$n_2 = \frac{n(N - n)}{N - 1} = \frac{150(307 - 150)}{(307 - 1)} = 77$$

Pour prévoir la marge de non réponse nous avons ajouté 25% de ce chiffre pour constituer la taille de l'échantillon pour avoir : $77 + 19 = 96$. (Valleron, A.-J. 1998)

La procédure de sélection a été l'échantillonnage systématique avec un pas de sondage de PS

$$= \frac{N}{n} = \frac{307}{96} = 3.$$

En effet, la liste des écoles au niveau de la sous division de Butembo I nous a servi pour sélectionner nos 96 établissements scolaires. Les 96 écoles représentent les 31 % de 307 établissements scolaires de la sous division Butembo I qui sont considérées comme un échantillon institutionnel descriptif. Durant neuf jours, du 9 juin au 17 juin 2026, nous avons sillonné les 96 établissements scolaires, muni de la lettre de recherche pour collecter les données à travers le questionnaire d'enquête.

2.2. Population et variables

L'enquête a couvert 96 établissements de la sous division Butembo I : 12 étatiques, 47 conventionnés et 37 privés agréés. Les variables portaient sur le profil du répondant, le niveau scolaire, les effectifs d'enseignants et d'élèves, les types de tableaux et de craies, les infrastructures d'hygiène, les signes sanitaires observés chez certains enseignants, les effets sur la salle de classe et le matériel, ainsi que les solutions envisagées. Plusieurs questions autorisaient des réponses multiples ; leurs pourcentages ne doivent donc pas être additionnés. La ville de Butembo est constituée de deux sous divisions à savoir Butembo I, qui couvrent les établissements scolaires de deux communes Kimemi et Vulamba où nous avons mené la recherche et la sous division Butembo II, qui est l'ensemble des écoles primaires, secondaires et maternelles implantées dans les communes Mususa et Bulengera.

2.3. Clarification des concepts

- **Poussière de craie** : ensemble des particules produites pendant l'écriture, l'effacement et le nettoyage du tableau. La composition des craies utilisées localement n'a pas été analysée ; elles peuvent contenir principalement du carbonate ou du sulfate de calcium, ainsi que divers additifs.
- **Signe rapporté** : manifestation qu'un répondant dit avoir observée chez un ou plusieurs enseignants de son école. Il ne s'agit ni d'un diagnostic médical ni d'un symptôme mesuré systématiquement auprès de l'ensemble du personnel.

- *Exposition potentielle* : présence habituelle d'enseignants ou d'élèves dans une classe où la craie est utilisée. Cette notion ne correspond pas à une dose individuelle mesurée.
- *Prévention* : ensemble des mesures de substitution, de réduction à la source, de ventilation, d'organisation du travail, de formation et de protection individuelle.

2.4. Analyse statistique

Les données avaient initialement été dépouillées sous SPSS. Lors de la présente révision, les effectifs agrégés des tableaux sources ont été vérifiés, puis les proportions ont été recalculées sur la base de 96 établissements. Des intervalles de confiance à 95 % selon la méthode de Wilson ont été ajoutés. Les comparaisons exploratoires entre les trois types d'écoles ont reposé sur un test exact conditionnel pour tableaux 3×2 , adapté aux faibles effectifs attendus, et sur le V de Cramer. Les tailles d'effet ont été interprétées avec prudence : environ 0,10 pour un effet faible, 0,30 pour un effet modéré et 0,50 pour un effet élevé. Aucune modélisation multivariée n'était possible à partir des seules données agrégées.

2.5. Considérations éthiques

Avant la collecte des données, les autorisations nécessaires ont été sollicitées auprès des responsables des établissements scolaires concernés. Les directeurs/préfets, enseignants invités à participer à l'étude ont reçu une information claire sur les objectifs de la recherche, les méthodes de collecte des données, les bénéfices attendus et leurs droits. Leur participation reposait sur un consentement libre, éclairé et volontaire. Afin de préserver les droits des participants, la confidentialité des informations recueillies et l'anonymat des répondants ont été strictement garantis. Aucune donnée permettant d'identifier individuellement un directeur/préfet, enseignant ou un établissement scolaire n'a été divulguée dans les résultats. Les participants étaient également libres de se retirer de l'étude à tout moment, sans avoir à fournir de justification et sans subir de préjudice. Les procédures de collecte des données ont été conçues de manière à minimiser tout inconfort et à respecter la dignité des participants. La sélection des participants a été réalisée de façon équitable, sans discrimination fondée sur le sexe, l'âge, l'ancienneté, le statut professionnel ou le type d'établissement. Enfin, l'étude a été menée dans le respect des principes d'intégrité scientifique. Les données ont été recueillies, analysées et interprétées avec rigueur, objectivité et transparence. Les résultats sont présentés de manière fidèle, sans falsification ni manipulation, et toutes les sources documentaires utilisées ont été correctement citées afin de respecter les règles de l'honnêteté scientifique et d'éviter toute forme de plagiat.

3. Résultats

3.1. Profil des établissements et des répondants

Près de la moitié des établissements étaient conventionnés (49,0 %), tandis que 38,5 % étaient privés agréés. Les responsables scolaires représentaient 57,3 % des répondants, ce qui confirme l'orientation institutionnelle de l'enquête. La diversité des fonctions occupées peut cependant avoir influencé la connaissance des symptômes individuels et introduit un biais d'information.

Tableau 1. Profil des 96 établissements et des répondants institutionnels.

Dimension	Catégorie	n	%
Type d'école	Étatique	12	12,5
	Conventionnée	47	49,0
	Privée agréée	37	38,5
Fonction du répondant	Directeur ou préfet	55	57,3
	Enseignant	36	37,5
	Comptable	4	4,2
	Surveillant	1	1,0
Niveau d'études	Diplôme d'État	45	46,9
	Graduat	25	26,0
	Licence	26	27,1

3.2. Population potentiellement exposée et supports pédagogiques

Les 96 établissements regroupaient 2 143 enseignants et 49 525 élèves. Ces nombres décrivent la population susceptible de fréquenter les classes où la craie est utilisée ; ils ne correspondent pas au nombre de personnes symptomatiques. Les femmes représentaient 64,1 % du personnel enseignant au primaire, alors que les hommes étaient majoritaires au secondaire (68,0 %). Toutes ces écoles utilisaient le tableau noir et la craie. Deux établissements disposaient également d'un tableau blanc et de marqueurs ; ils ont été comptabilisés une seule fois dans le total des 96 écoles. Aucun tableau numérique n'a été signalé.

Tableau 2. Effectifs institutionnels potentiellement présents dans les environnements où la craie est utilisée.

Niveau	Écoles	Classes	Enseignants	Hommes	Femmes	Élèves	Filles	Garçons	An- cienneté moyenne
Primaire	58	669	779	280	499	26 652	15 809	10 843	8,5
Secondaire	38	732	1 364	927	437	22 873	12 355	10 518	7,9
Total	96	1 401	2 143	1 207	936	49 525	28 164	21 361	-

3.3. Signes sanitaires rapportés au niveau des établissements

Au moins un signe respiratoire était rapporté dans 87 écoles sur 96, soit 90,6 % (IC à 95 % : 83,1-95,0). La toux fréquente et l'irritation du nez ou de la gorge étaient les manifestations les plus souvent citées. Des signes oculaires ou cutanés étaient signalés dans 90 écoles (93,8 % ; IC à 95 % : 87,0-97,1), la sécheresse des mains étant la manifestation spécifique la plus fréquente.

Ces pourcentages décrivent des établissements, et non des enseignants. Une école classée positive pouvait compter une seule personne concernée ou plusieurs. Les données ne permettent donc de calculer ni un taux de maladie, ni une incidence, ni une relation dose-réponse.

Tableau 3. Proportion d'établissements rapportant des signes chez certains enseignants.

Signe ou groupe de signes	Écoles (n)	%	IC à 95 %
Au moins un signe respiratoire rapporté	87	90,6	83,1-95,0
Toux fréquente	62	64,6	54,6-73,4
Irritation du nez ou de la gorge	52	54,2	44,2-63,8
Allergies respiratoires	31	32,3	23,8-42,2
Aggravation de l'asthme	13	13,5	8,1-21,8
Au moins un signe oculo-cutané rapporté	90	93,8	87,0-97,1
Sécheresse des mains	64	66,7	56,8-75,3
Rougeur des yeux	45	46,9	37,2-56,8
Irritation des yeux	42	43,8	34,3-53,7
Larmoiement	36	37,5	28,5-47,5
Picotements oculaires	19	19,8	13,1-28,9
Craquelures ou démangeaisons	10	10,4	5,8-18,1

3.4. Effets sur la propreté, la visibilité, le matériel et le confort

La salissure des vêtements était le constat le plus répandu (96,9 %). Un problème de visibilité était rapporté dans 93,8 % des écoles : accumulation de poussière sur le tableau, écritures devenant floues ou difficulté de lecture pour les élèves éloignés. Deux établissements sur trois signalaient une usure rapide de la surface du tableau, et 63,5 % mentionnaient des traces difficiles à effacer.

La question dépasse donc la seule santé respiratoire. Elle touche aussi la lisibilité du support, le temps consacré à l'entretien, la propreté des cahiers et des équipements, ainsi que le confort de l'enseignant. Ces dimensions plaident pour une lecture conjointe de la santé au travail et de la qualité pédagogique.

Tableau 4. Effets environnementaux et pédagogiques rapportés. Plusieurs réponses étaient possibles.

Effet rapporté	Écoles (n)	%	IC à 95 %
Vêtements salis par la poussière	93	96,9	91,2-98,9
Propreté de la salle réduite	56	58,3	48,3-67,7
Bancs, cahiers ou matériels couverts	43	44,8	35,2-54,7
Au moins un problème de visibilité	90	93,8	87,0-97,1
Tableau devenu moins lisible	64	66,7	56,8-75,3
Élèves éloignés voyant difficilement	54	56,2	46,3-65,7
Écritures devenant floues	48	50,0	40,2-59,8
Usure rapide de la surface du tableau	64	66,7	56,8-75,3
Traces difficiles à effacer	61	63,5	53,6-72,5
Matériel électronique potentiellement endommagé	32	33,3	24,7-43,2
Mains blanchies après usage	70	72,9	63,3-80,8
Fatigue liée au nettoyage fréquent	50	52,1	42,2-61,8
Gêne respiratoire pendant le cours	46	47,9	38,2-57,8

Air jugé malsain dans les classes peu ventilées	74	77,1	67,7-84,4
Environnement d'étude inconfortable	44	45,8	36,2-55,8

3.5. Capacités de prévention et transition technologique

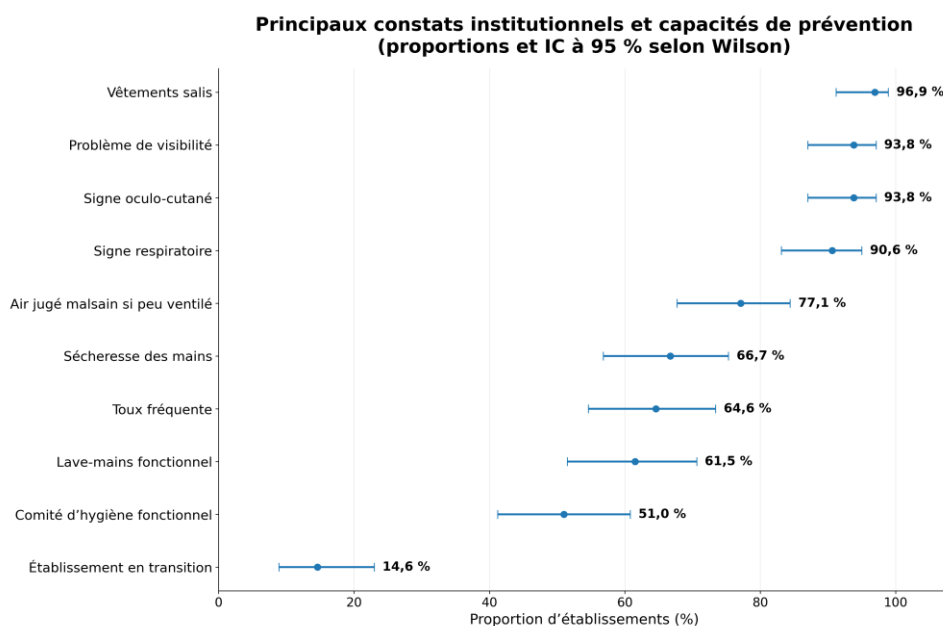
Un lave-mains fonctionnel était disponible dans 61,5 % des établissements, tandis qu'un comité d'hygiène fonctionnel n'était présent que dans 51,0 %. Les tableaux blancs étaient mieux connus que les craies à faible émission ou les tableaux numériques. Pourtant, seuls 14 établissements (14,6 %) avaient engagé un processus de changement. Le coût, cité par 46 écoles (47,9 %), illustre l'écart entre la connaissance des solutions et la capacité réelle d'investissement.

Tableau 5. Capacités de prévention, connaissance des alternatives et obstacles à la transition.

Indicateur de prévention ou de transition	Écoles (n)	%	IC à 95 %
Lave-mains fonctionnel	59	61,5	51,5-70,6
Comité d'hygiène fonctionnel	49	51,0	41,2-60,8
Connaissance des craies à faible émission	38	39,6	30,4-49,6
Connaissance des tableaux blancs	59	61,5	51,5-70,6
Connaissance des tableaux numériques	25	26,0	18,3-35,6
Établissements engagés dans un changement	14	14,6	8,9-23,0
Coût identifié comme obstacle principal	46	47,9	38,2-57,8

Afin de synthétiser les principaux résultats de l'enquête, la figure ci-dessous présente les proportions d'établissements ayant rapporté les constats sanitaires, pédagogiques et environnementaux les plus fréquents, ainsi que les principales capacités de prévention disponibles. Les estimations sont accompagnées de leurs intervalles de confiance à 95 %, calculés selon la méthode de Wilson. L'ensemble met en évidence un contraste marqué entre, d'une part, la fréquence élevée des problèmes rapportés — notamment la salissure des vêtements, les difficultés de visibilité et les signes oculocutanés ou respiratoires — et, d'autre part, la faiblesse relative des mesures de prévention et de la transition vers des solutions alternatives. Ces résultats doivent toutefois être interprétés au niveau des établissements et non comme des prévalences individuelles chez les enseignants.

Figure 2. Proportions institutionnelles et intervalles de confiance à 95 % pour les principaux constats sanitaires, pédagogiques et préventifs.



3.6. Comparaisons exploratoires selon le type d'école

La plupart des signes et des effets rapportés ne différaient pas significativement entre les trois types d'écoles. Cette relative homogénéité est cohérente avec l'usage quasi universel du tableau noir, mais elle peut aussi traduire une puissance statistique limitée, en particulier dans le groupe des 12 écoles étatiques.

La disponibilité des lave-mains présentait l'écart le plus marqué : 25,0 % dans les écoles étatiques, contre 68,1 % dans les écoles conventionnées et 64,9 % dans les écoles privées agréées (p exact = 0,021 ; $V = 0,285$). Après regroupement des écoles non étatiques, les écoles étatiques avaient une probabilité nettement plus faible de disposer d'un lave-mains ($OR = 0,17$; IC à 95 % approximatif : 0,04-0,66 ; test exact de Fisher : $p = 0,009$). Ce résultat doit être vérifié sur un échantillon plus large avant d'orienter une décision publique.

Tableau 6. Comparaisons exploratoires des proportions selon le type d'établissement.

Indicateur	Étatique %	Conventionnée %	Privée %	p exact	V de Cramer
Au moins un signe respiratoire	83,3	91,5	91,9	0,781	0,095
Toux fréquente	50,0	66,0	67,6	0,525	0,116
Au moins un signe oculo-cutané	83,3	95,7	94,6	0,325	0,164
Vêtements salis	91,7	100,0	94,6	0,264	0,183
Tableau moins lisible	66,7	68,1	64,9	0,954	0,032
Air jugé malsain	83,3	76,6	75,7	0,891	0,057
Lave-mains fonctionnel	25,0	68,1	64,9	0,021	0,285
Comité d'hygiène fonctionnel	41,7	53,2	51,4	0,811	0,073
Connaissance des tableaux blancs	58,3	63,8	59,5	0,876	0,048

Indicateur	Étatique %	Conventionnée %	Privée %	p exact	V de Cramer
Engagement dans le changement	8,3	14,9	16,2	0,856	0,069
Coût comme obstacle	41,7	48,9	48,6	0,919	0,047

4. Discussion

4.1. Principaux enseignements

Quatre enseignements se dégagent. Premièrement, l'exposition potentielle est généralisée puisque toutes les écoles utilisent la craie. Deuxièmement, les établissements rapportent fréquemment des signes respiratoires et oculo-cutanés chez certains enseignants, sans que l'enquête permette de connaître le nombre exact de personnes concernées. Troisièmement, les effets pédagogiques et matériels occupent une place aussi importante que les effets sanitaires perçus. Enfin, les capacités de prévention et l'engagement dans la transition restent nettement en retrait par rapport à la fréquence des problèmes signalés.

4.2. Plausibilité sanitaire sans surinterprétation causale

Les constats de toux, d'irritation et de sécheresse cutanée sont biologiquement plausibles. La littérature montre que l'écriture et l'effacement à la craie libèrent une fraction de particules inhalables et respirables, dont la quantité varie selon la composition de la craie, l'état du tableau et les pratiques d'utilisation (Goel et al., 2017 ; Sekar et al., 2021 ; Mbazima et al., 2024). Une revue systématique récente retient l'inhalation et le contact cutané comme voies d'exposition pertinentes, tout en soulignant la rareté des études africaines (Mbazima et al., 2024).

Les résultats obtenus à Butembo ne démontrent toutefois pas que la poussière de craie est à l'origine des manifestations observées. La fumée de biomasse, le tabagisme passif, les infections saisonnières, les moisissures, la circulation routière, les allergies, l'humidité et les antécédents personnels peuvent également influencer les symptômes respiratoires. L'étude de Tesfaye et al. (2023) illustre cette pluralité de facteurs : la craie et la ventilation étaient associées aux symptômes, mais d'autres expositions individuelles et domestiques intervenaient aussi. Il convient donc de parler de signes compatibles avec l'exposition ou possiblement associés à celle-ci, et non de maladies causées par la craie.

Ces observations relèvent principalement de la santé au travail et de la qualité de l'air, plutôt que de la prévention et du contrôle des infections au sens strict. La poussière de craie constitue d'abord un risque particulière et irritatif, non un agent infectieux. Le cadre PCI-EHA reste utile pour l'hygiène des mains, le nettoyage, la ventilation et l'environnement scolaire, mais il doit être complété par l'ergonomie et la prévention des risques professionnels.

4.3. Qualité pédagogique et environnement d'apprentissage

Les résultats montrent que la poussière est également perçue comme une contrainte didactique : baisse de la lisibilité, traces persistantes, difficulté visuelle pour les élèves éloignés et temps consacré au nettoyage. La littérature sur les environnements scolaires indique qu'une mauvaise qualité de l'air et une ventilation insuffisante sont liées au confort, à l'absentéisme et à certaines dimensions de la performance scolaire (Wargocki et al., 2020 ; Wargocki, 2022 ; Honan et al., 2024). La présente étude n'a pas

mesuré les performances des élèves, mais elle met en évidence des mécanismes intermédiaires qui méritent une investigation pédagogique spécifique.

Une innovation pertinente ne consiste pas simplement à remplacer un tableau par un autre. La critique formulée par Mpia (2020) à propos des insuffisances didactiques et structurelles de l'enseignement de l'informatique en RDC est ici éclairante : sans formation, maintenance, accompagnement pédagogique et financement récurrent, les technologies risquent de rester sous-utilisées. De même, la perspective d'une symbiose entre intelligence naturelle et intelligence artificielle défendue par Mpia et al. (2024) invite à concevoir les outils numériques comme des moyens d'enrichir le travail enseignant, plutôt que comme une fin en soi ou un substitut à l'enseignant.

4.4. Le tableau blanc : une alternative qui n'est pas dépourvue de risques

Le remplacement progressif du tableau noir peut réduire l'émission de particules de craie, mais il déplace une partie du risque vers les solvants, les déchets de marqueurs, le coût des consommables et la dépendance aux approvisionnements. Des travaux ont mis en évidence des émissions de composés organiques volatils provenant de marqueurs permanents ou effaçables (Castorina et al., 2016). Une étude récente a également examiné l'exposition de professeurs aux composés BTEX issus de marqueurs pour tableaux blancs (Ghasemi et al., 2025). Les achats devraient donc privilégier des marqueurs à faible odeur et à faibles émissions, des modèles rechargeables lorsque cela est possible, une bonne ventilation et une gestion appropriée des déchets.

Les tableaux numériques offrent des possibilités pédagogiques supplémentaires, mais ils supposent une alimentation électrique fiable, des conditions de sécurité adaptées, une connectivité suffisante, une maintenance disponible et une formation des utilisateurs. Dans un contexte de ressources limitées, une solution hybride paraît plus réaliste : amélioration des tableaux conventionnels, pratiques réduisant les émissions, installation ciblée de tableaux blancs et mutualisation des outils numériques pour les activités qui en tirent un bénéfice pédagogique réel.

4.5. Interprétation des différences entre les types d'écoles

L'absence de différences marquées pour la plupart des signes laisse penser que le risque perçu traverse les différents réseaux scolaires. L'écart observé pour les lavemains pourrait refléter des différences de financement, de gestion ou d'appui des partenaires. Toutefois, le faible nombre d'écoles étatiques ne permet pas une interprétation définitive. Cette analyse devrait être reproduite à partir d'un échantillonnage probabiliste et de données recueillies dans chaque école sur le budget, l'occupation des classes, la ventilation et l'état des bâtiments.

4.6. Forces et limites

Cette étude apporte des données locales encore rares, couvre plusieurs réseaux scolaires et réunit des dimensions sanitaires, pédagogiques, environnementales et organisationnelles. L'ajout d'intervalles de confiance renforce la lecture statistique et évite l'impression de précision que peuvent donner des pourcentages isolés.

Plusieurs limites doivent néanmoins être prises en compte. Le devis transversal ne permet pas d'établir la temporalité. Un seul répondant s'exprimait au nom de

chaque école. Les symptômes n'ont pas été recueillis directement auprès de chaque enseignant, validés médicalement ou rattachés à une période de référence standardisée. Aucune mesure de PM10, PM2,5, CO2, température, humidité ou débit de ventilation n'a été réalisée. La composition des craies et les méthodes d'effacement n'ont pas été documentées par marque ou par classe. Enfin, les réponses multiples sont sensibles à la perception et à la désirabilité sociale, tandis que la procédure de sélection des écoles et les informations éthiques restent à préciser.

5. Cadre de prévention et recommandations

La prévention devrait suivre la hiérarchie des contrôles, qui privilégie les mesures agissant sur la source plutôt que le seul recours à la protection individuelle. Dans le contexte de Butembo, la transition peut être organisée en trois horizons complémentaires.

5.1. Mesures immédiates à faible coût (0-6 mois)

- Interdire de frapper ou secouer les brosse dans la salle ; les nettoyer à l'extérieur et loin des élèves.
- Remplacer l'effacement à sec par un chiffon ou une éponge légèrement humide, sans détremper le tableau.
- Ouvrir les portes et les fenêtres afin d'obtenir une ventilation traversante, lorsque les conditions extérieures le permettent.
- Nettoyer les surfaces avec une méthode humide et éviter le balayage à sec, qui remet les particules en suspension.
- Former les enseignants, les élèves chargés du nettoyage et les agents d'entretien aux pratiques de réduction de la poussière.
- Orienter vers un service de santé les enseignants présentant des symptômes persistants, une gêne respiratoire ou une aggravation d'asthme.

5.2. Mesures institutionnelles (6-18 mois)

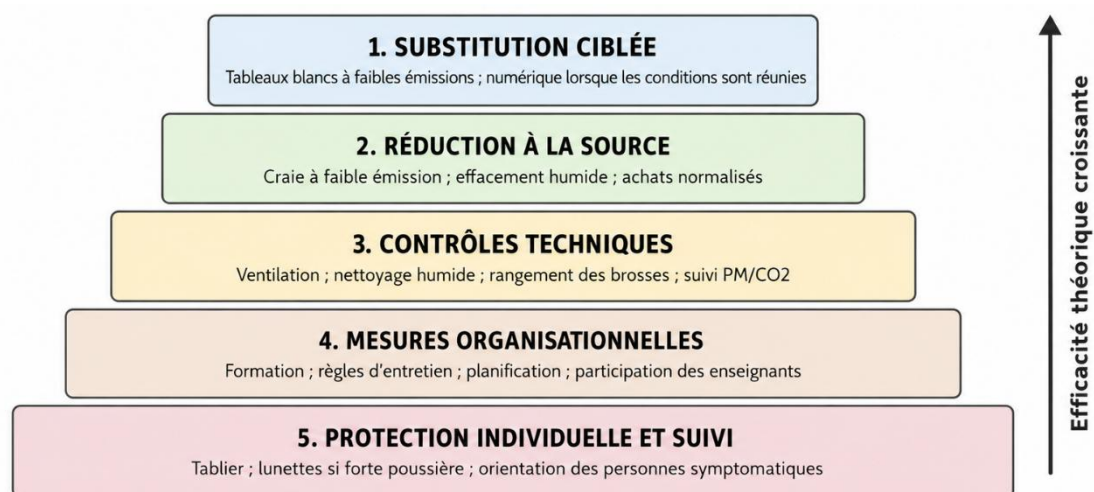
- Adopter un cahier des charges pour l'achat de craies dont les faibles émissions ont été vérifiées et de tableaux à surface lisse.
- Installer des lave-mains fonctionnels avec eau et savon, en priorité dans les écoles étatiques identifiées comme moins équipées.
- Intégrer la qualité de l'air, la ventilation, la propreté et la lisibilité dans les inspections scolaires et les plans d'amélioration.
- Tester, dans un sous-échantillon, des capteurs à faible coût pour mesurer les PM2,5, les PM10, le CO2, la température et l'humidité, selon un protocole d'étalonnage et d'assurance qualité.
- Documenter les coûts complets des options : achat initial, consommables, maintenance, énergie, sécurité, déchets et formation.

5.3. Transition ciblée et innovation pédagogique (18-36 mois)

- Prioriser le remplacement dans les classes mal ventilées, surpeuplées, accueillant des enseignants asthmatiques ou disposant d'équipements électroniques sensibles.
- Utiliser des tableaux blancs avec marqueurs à faibles émissions et rechargeables lorsque la chaîne d'approvisionnement est fiable.
- Introduire les tableaux numériques uniquement dans les salles où l'électricité, la sécurité, la formation et les objectifs pédagogiques sont assurés, plutôt que de les distribuer uniformément.

- Mettre en place un fonds de cofinancement associant pouvoirs publics, partenaires et écoles, ainsi qu'un plan de maintenance préalable à tout déploiement technologique.
- Associer les enseignants à l'évaluation des solutions afin que la technologie renforce leurs capacités et reste adaptée aux contenus, aux effectifs et aux langues d'enseignement.

Figure 3. Hiérarchie des contrôles et feuille de route de prévention adaptée aux écoles à ressources limitées.



5.4. Proposition de recherche innovante : « Classe saine Butembo »

Pour transformer ce signal institutionnel en preuve robuste, une étude prospective quasi expérimentale est recommandée. Des classes comparables seraient réparties par grappes entre quatre stratégies : pratique habituelle, craie à faible émission, effacement humide associé à une ventilation renforcée, et tableau blanc utilisant des marqueurs à faibles émissions. Les mesures seraient répétées avant et après l'intervention.

- Mesurer en continu les PM10, PM2,5, CO2, température et humidité pendant l'écriture, l'effacement et les périodes sans enseignement.
- Recueillir directement auprès des enseignants des symptômes standardisés, la fonction pulmonaire (spirométrie ou débit expiratoire de pointe), les antécédents et les expositions domestiques.
- Évaluer, chez les élèves, la lisibilité, le confort, l'attention, l'absentéisme et les résultats à une courte tâche cognitive adaptée à l'âge.
- Analyser, pour chaque option, les coûts complets, la durabilité, l'acceptabilité, le temps de nettoyage et la production de déchets.
- Utiliser des modèles multiniveaux tenant compte de l'imbrication des mesures dans les classes et les écoles, et préenregistrer les hypothèses principales.

Un tel protocole permettrait d'estimer l'effet propre de chaque mesure, de mieux contrôler les facteurs de confusion et de produire une recommandation locale fondée sur le rapport coût-efficacité. Après anonymisation, les données et le code d'analyse devraient être déposés dans un répertoire ouvert afin de renforcer la reproductibilité et l'utilité scientifique et politique de la recherche.

6. Conclusion

Dans les 96 établissements scolaires enquêtés à Butembo, le tableau noir et la craie étaient utilisés de manière universelle, dans un environnement fréquenté par plus de deux mille enseignants et près de cinquante mille élèves. Les répondants signalaient souvent des manifestations respiratoires et oculo-cutanées chez certains enseignants, ainsi que des difficultés de propreté, de lisibilité, de confort et d'entretien. Dans le même temps, les moyens de prévention et la transition vers d'autres supports restaient limités, principalement en raison des coûts.

Ces résultats constituent un signal en matière de santé au travail et de qualité pédagogique, mais non une preuve causale. La réponse la plus réaliste n'est ni l'inaction ni le remplacement immédiat et uniforme de tous les tableaux. Elle repose sur la réduction de la poussière à la source, l'effacement humide, l'amélioration de la ventilation, la formation, la surveillance et une substitution progressive par des technologies à faibles émissions, soutenables et cohérentes avec les objectifs d'apprentissage. Une étude prospective associant mesures instrumentales et données cliniques reste nécessaire pour élaborer une politique fondée sur des preuves locales.

Contributions : Conceptualisation, KKD; méthodologie, KKD; validation, KKD ; Investigation, KKD; ressources, KKD; Traitement des données, KKD; écrire le manuscrit, KKD; visualisation, KKD; supervision, KKD; correction du manuscrit, KKD.

L'auteur a lu et approuvé la version publiée de ce manuscrit.

Sponsor financier : Cette recherche n'a reçu aucun soutien financier.

Disponibilité des données : Les données ne sont pas disponibles.

Remerciement : Non applicable.

Conflits d'intérêt : L'auteur déclare aucun conflit d'intérêt.

Références

1. Castorina, R., Tysman, M., Bradman, A., et al. (2016). Volatile organic compound emissions from markers used in preschools, schools, and homes. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1080/03067319.2016.1250892>
2. Ghasemi, R., Saranjam, B., Zarei, A., Babaei, A., Ghafari, H. R., & Fazlzadeh, M. (2025). Assessment of health risks of university professors through exposure to BTEX compounds from white board markers. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92336-7>
3. Goel, S., Patidar, R., Baxi, K., & Thakur, R. S. (2017). Investigation of particulate matter performances in relation to chalk selection in classroom environment. *Indoor and Built Environment*, 26(1), 119-131. <https://doi.org/10.1177/1420326X15607951>
4. Honan, D., Gallagher, J., Garvey, J., & Littlewood, J. (2024). Indoor air quality in naturally ventilated primary schools: A systematic review of the assessment and impacts of CO2 levels. *Buildings*, 14(12), 4003. <https://doi.org/10.3390/buildings14124003>
5. Lin, C.-C., Lee, M.-K., & Huang, H.-L. (2015). Effects of chalk use on dust exposure and classroom air quality. *Aerosol and Air Quality Research*, 15, 2596-2608. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.04.0216>
6. Majumdar, D., & William, S. P. M. P. (2009). Chalk dustfall during classroom teaching: Particle size distribution and morphological characteristics. *Environmental Monitoring and Assessment*, 148, 343-351. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0164-2>

7. Mbazima, S. J., Fagbohun, O. F., Moolla, R., Anand, K., & Joseph, J. S. (2025). Knowledge, practices, and health effects of exposure to chalk particles in classrooms among public secondary school teachers in the Johannesburg region. *International Journal of Environmental Health Research*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/09603123.2025.2594110>
8. Mbazima, S. J., Moolla, R., & Joseph, J. S. (2024). Release and health outcomes of exposure to chalk particles in classrooms: A systematic literature review. *International Journal of Environmental Health Research*, 34(10), 3515-3539. <https://doi.org/10.1080/09603123.2024.2311228>
9. Mpia, H. N. (2020). Des griefs de l'échec de l'enseignement de l'informatique dans des universités de la RDC : enjeux sociodidactiques de la crise. *Etincelle*, 22(1), 1-14. <https://doi.org/10.61532/rime221111>
10. Mpia, H. N., Nzanu, M. M., & Kasolene, M. K. (2024). De l'intelligence naturelle à l'intelligence artificielle ou de l'intelligence artificielle à l'intelligence naturelle : une exploration des liens et des synergies. *Etincelle*, 25(2). <https://doi.org/10.61532/rime252111>
11. Ojukwu, C. P., Ogunlaja, P. C., Ede, S. S., et al. (2022). Pulmonary functions and associated risk factors among school teachers in a selected Nigerian population. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 28, 883-889. <https://doi.org/10.1080/10803548.2020.1840033>
12. Sadrizadeh, S., Yao, R., Yuan, F., et al. (2022). Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*, 57, 104908. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104908>
13. Sekar, A., Varghese, G. K., & Varma, R. M. K. (2021). Occupational exposure to particulate matter during blackboard teaching and its deposition in the airways of human lungs. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 94(8), 1963-1974. <https://doi.org/10.1007/s00420-021-01713-y>
14. Tesfaye, A. H., Gebrehiwot, M., Aragaw, F. M., & Dessie, A. (2023). Prevalence and risk factors of chronic respiratory symptoms in public and private school teachers in north-western Ethiopia: Results from a multicentre cross-sectional study. *BMJ Open*, 13(4), e069159. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-069159>
15. Valleron, A.-J. (1998). *Introduction à la Biostatistique*. Paris : Masson. (ISBN : 978-2225832857).
16. Von Elm, E., Altman, D. G., Egger, M., Pocock, S. J., Gøtzsche, P. C., & Vandenbroucke, J. P. (2007). The Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE) statement: Guidelines for reporting observational studies. *PLoS Medicine*, 4(10), e296. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0040296>
17. Wargocki, P. (2022). Effects of classroom air quality on learning in schools. In Y. Zhang, P. K. Hopke, & C. Mandin (Eds.), *Handbook of Indoor Air Quality* (pp. 1447-1459). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7680-2_65
18. Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A., Contreras-Espinoza, S., & Bahnfleth, W. (2020). The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment*, 173, 106749. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106749>
19. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/345229>